

**Elaboración del prototipo de un sistema de control de variables atmosféricas
automatizado para el cultivo de plantas bajo invernadero en ambiente indoor en la
Región Caribe**

DANIEL ALFONSO ANAYA SOLANO

LUIS FELIPE OJEDA FIELD



**Universidad de la Costa - CUC
Departamento de Energía
Programa de Ingeniería Eléctrica
Barranquilla
2020**

**Elaboración del prototipo de un sistema de control de variables atmosféricas
automatizado para el cultivo de plantas bajo invernadero en ambiente indoor en la
Región Caribe**

**DANIEL ALFONSO ANAYA SOLANO
LUIS FELIPE OJEDA FIELD**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO ELÉCTRICO

Tutores

Ph.D MELISA ANDREA ACOSTA COLL

**Universidad de la Costa - CUC
Departamento de Energía
Programa de Ingeniería Eléctrica
Barranquilla**

2020

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

Este trabajo de grado va dedicado a nuestros padres y madres, Luis Anaya y Stella Solano, Luis Ojeda y Liliana Field, a la familia Mendoza Rizo y a la familia Primo Niebles por su incondicional apoyo y hospitalidad. Sin los cuales no fuera sido posible haber llegado hasta este punto. Quienes con esfuerzo y sacrificio nos permiten recoger hoy lo que sembramos hace ya más de dos años.

Agradecimientos

Estamos agradecidos con la Universidad de la Costa CUC, en especial con cada uno de los profesores del programa de ingeniería eléctrica, quienes de forma particular contribuyeron a nuestra formación profesional. Gracias también a nuestra tutora de tesis ingeniera Melisa Acosta, que siempre estuvo dispuesta a guiarnos a lo largo de este trabajo, gracias por su paciencia y dedicación.

.

Resumen

El presente proyecto de grado propone un prototipo de invernadero para el cultivo de plantas comestibles, vegetales y frutos en ambientes indoor (situado dentro de un recinto o bajo cubierta) de forma controlada y automatizada. A través de una tarjeta electrónica ARDUINO, se controla de forma automatizada las variables ambientales más significativas que influyen en el crecimiento de las plantas, tales como, temperatura, humedad del aire, humedad del suelo e iluminación. Asimismo, se desarrolló una aplicación móvil, que permite el monitoreo y control del cultivo o planta en el interior del invernadero. Finalmente, se presentan los análisis de las mediciones proporcionadas por el invernadero, y se exponen conclusiones a partir de las mismas.

Palabras clave: Invernadero, ARDUINO, control, plantas

Abstract

This grade project proposes a prototype greenhouse for the cultivation of edible plants, vegetables and fruits in indoor environments (located inside an enclosure or under cover) in a controlled and automated manner. Through an ARDUINO electronic card, the most significant environmental variables that influence plant growth, such as temperature, air humidity, soil moisture and illuminance, are controlled automatically. In addition, a mobile application was developed, which allows monitoring and control of the crop or plant inside the greenhouse. Finally, the analyses of the measurements provided by the greenhouse are presented, and conclusions are presented from them.

Keywords: Greenhouse, ARDUINO, control, plants

Contenido

Lista de tablas y figuras	10
Introducción	12
Capítulo 1: Aspectos generales del proyecto.....	14
1.1. Descripción del problema	14
1.2 Hipótesis.....	16
1.3 Justificación	16
1.4 Objetivos.....	20
1.4.1 Objetivo general.	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
1.5 Delimitación del proyecto.....	20
1.5.1 Alcance.	20
1.5.2 Limitaciones.....	21
1.6. Estado del Arte.....	21
1.6.1 Control y monitorización de los invernaderos.	21
1.6.2 Regulación de la humedad en el ambiente controlado.	22
1.6.3 Estructura del invernadero.	23
1.7 Diseño metodológico.....	24
1.7.1 Método de investigación.....	24
Capítulo 2: Marco Teórico	25
2.1. Invernadero	25
2.2 Arduino.....	26
2.2.1 Características del microcontrolador.	27
2.3 Humedad del suelo	27
2.4 Temperatura ambiente	28
2.5 Iluminación	28
2.6 Fertilidad del suelo.....	29
Capítulo 3. Desarrollo e implementación del proyecto.....	30
3.1 Diseño metodológico del proyecto.....	30
3.2. Etapa I: Diseño del sistema de medición y control	31

3.2.1 Selección de variables a controlar.	31
3.2.2 Selección del microcontrolador y sensores.	32
3.2.3 Subsistema de riego.	32
3.2.4 Subsistema de Iluminación.	36
3.2.5 Subsistema de ventilación.	38
3.2.6 Subsistema de control de nivel.	41
3.2.7 Subsistema de control de tiempo.	43
3.2.8 Diseño del circuito para el sistema de control.	44
3.3 Etapa II: Diseño e implementación de la estructura física y electrónica del prototipo final ..	46
3.3.1 Prototipo 1.	46
3.3.2 Prototipo 2.	47
3.3.3 Prototipo final.	48
3.4. Etapa III: Mediciones y pruebas	58
3.4.1. Medición de humedad relativa del suelo.	58
3.4.2. Medición de temperatura.	62
3.4.3. Medición de porcentaje de iluminación.	64
4. Conclusiones	66
Referencias.	69
Anexos.	73

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 1 Fuentes secundarias, bases de datos y su clasificación	21
Tabla 2 Etapas de diseño e implementación del prototipo final.	30
Tabla 3 Características principales del prototipo 1.....	47
Tabla 4 Características principales del prototipo 2.....	48
Tabla 5 Características principales del prototipo final.....	48
Tabla 6 Partes del prototipo final.....	51
Tabla 7 Lista de materiales utilizados en la construcción del prototipo final.	54

Figuras

Figura 1. Microcontrolador ARDUINO Nano.....	26
Figura 2. Profundidad de las raíces de las plantas con y sin fertilización.	29
Figura 3. Módulo ARDUINO SKU (SEN0114).....	33
Figura 4. Bomba De Agua Para Fuente (PF-228).....	34
Figura 5. Tubo de vinilo transparente manguera.	35
Figura 6. LDR analógico.	36
Figura 7. Barras rotativas de iluminación.	37
Figura 8. Módulo ARDUINO DTH11.	39
Figura 9. Barrido del espacio.....	39
Figura 10. Sistema de ventilación impulsión – Extracción.....	40
Figura 11. Circulación de aire en el prototipo final.	40
Figura 12. Sensor de nivel ULN2003A.....	41
Figura 13. Esquema interno del ULN2003A.	42
Figura 14. Buzzer activo utilizado en el sistema de alertas.....	43
Figura 15. Modulo DS3231 / AT24C32 Reloj.	43
Figura 16. Diagrama de flujo programado para el sistema de control.	44
Figura 17. Diagrama electrónico del sistema de control – Proteus.....	45
Figura 18. Imagen representativa del prototipo 1.	46
Figura 19. Imagen representativa del prototipo 2.	48

Figura 20. Vista frontal del prototipo final.....	49
Figura 21. Vista lateral derecha del prototipo final.	50
Figura 22. Vista lateral izquierda del prototipo final.	50
Figura 23. Partes del prototipo final.....	51
Figura 24. Cara superior del diseño electrónico – Proteus.....	52
Figura 25. Cara inferior del diseño electrónico – Proteus.....	52
Figura 26. Imágenes representativas del prototipo final	53
Figura 27. Interfaz de la aplicación Android para monitorear el invernadero.	57
Figura 28. Día 1 - Humedad del suelo sin irrigar.	59
Figura 29. Día 1 - Humedad del suelo irrigado.	59
Figura 30. Día 2 - Humedad del suelo sin irrigar.	60
Figura 31. Día 2 - Humedad del suelo irrigado	60
Figura 32. Día 3 - Humedad del suelo sin irrigar	61
Figura 33. Día 3 - Humedad del suelo irrigado	61
Figura 34. Posición del higrómetro en suelo.	62
Figura 35. Comportamiento de la temperatura día 1.....	63
Figura 36. Comportamiento de la temperatura día 2.....	63
Figura 37. Luminosidad en ambiente indoor – Día 1.....	64
Figura 38. Luminosidad en ambiente outdoor - Día 2.	65

Introducción

Este proyecto de grado presenta el desarrollo de un prototipo para el cultivo de plantas comestibles y vegetales en ambientes indoor de forma controlada y automatizada. Actualmente, el interés por la calidad nutricional de lo que se consume a diario se ha incrementado, gracias a esto, muchos individuos procuran cultivar sus propios alimentos. No obstante, la calidad puede ser interpretada de muchas maneras; el consumidor desconfía de los alimentos convencionales por la falta de información que tiene de estos. Los estudios de (Schroeder, Tonsort, Pennings, & Minter, 2007; Setbon, Raude, Fischler, & Flahault, 2005) revelan una preferencia gradual por parte de las personas hacia los alimentos sanos y orgánicos, de igual forma, trabajos similares (Weatherell, Tregear, & Allinson, 2003) señalan que las personas prefieren los alimentos que poseen características adicionales, por ejemplo, su relación con el medio ambiente. Por otra parte, factores como el tiempo dedicado al cultivo de las plantas, y el espacio adecuado dentro de las viviendas les impide llevar a cabo el cultivo propio; el tomate, por ejemplo, es sembrado en todas las regiones de Colombia, además, es considerado uno de los cultivos agrícolas de mayor importancia; esta hortaliza alcanza su madurez a los 120 días de su plantado, este periodo de tiempo solo se garantiza si se siguen los parámetros establecidos para su cultivo, en otras palabras, tiempo y labor requeridos (Barraza, Fischer, & Cardona, 2004).

Este trabajo de grado se realizó con el fin de presentar una solución a la falta de tiempo y espacio para el cultivo propio de plantas comestibles en ambiente de interiores (indoor) a un bajo costo. Según los resultados de la investigación, para garantizar el crecimiento del ente vegetal es necesario controlar el ambiente circundante de este. Según (Barraza et al., 2004) las variables que más afectan el comportamiento de una planta son la: humedad del suelo, temperatura y luz solar. El prototipo desarrollado mantiene las condiciones ambientales controladas para que la

planta se desarrolle con la menor intervención humana. Asimismo, es de fácil instalación y su tamaño es adecuado para cualquier tipo de vivienda.

La metodología utilizada en el presente proyecto fue experimental. Inicialmente, se realizó una revisión sistemática de los sistemas electrónicos autónomos disponibles en el mercado para relevar el trabajo manual en el cultivo de plantas comestibles, teniendo en cuenta las variables ambientales que influyen en su crecimiento. Por otro lado, se ejecutó búsquedas bibliográficas para soportar argumentativamente las decisiones tomadas en el diseño y elaboración del prototipo. Finalmente, se construyó un prototipo funcional de bajo costo capaz de aprovechar espacio y de mantener de manera óptima los organismos vegetales.

Capítulo 1: Aspectos generales del proyecto

1.1 Descripción del problema

El control de variables ambientales para el cultivo de plantas tiene como objetivo principal proveer las condiciones ambientales para un crecimiento adecuado de la planta. Dicho objetivo está muy lejos de ser reciente, puesto que numerosos estudios han sido publicados dejando como resultado avances considerables en este campo.

Controlar el ambiente circundante de la planta es un factor fundamental que contribuye a mejorar la salud de las personas. De acuerdo con Taras Teslyuk en el artículo llamado *“Automated Control System for ARDUINO and Android Based Intelligent Greenhouse”*: “el mundo se está preparando cada vez más para enfrentar el problema de la escasez de alimentos de alta calidad. Una manera de resolver parcialmente este problema es utilizar la tecnología para controlar el ambiente de crecimiento de las plantas usando invernaderos” (Teslyuk, Denysyuk, Kernytskyy, & Teslyuk, 2015).

Según (Bär Nora, 2007), en su artículo de ciencia y salud *“Crean plantas que crecen en medios hostiles”* del periódico LA NACIÓN, más de la tercera parte de suelos del planeta no son aptos para cultivos; es decir, que las plantas no pueden crecer a su máxima capacidad en dichos espacios inhóspitos, sin embargo, la ciencia ha intentado atacar estas debilidades modificando el genoma de las plantas, con el fin de aportar mucha más adaptabilidad para superar estos ambientes. Asimismo, (Bär Nora, 2007) afirma que científicos del instituto de Biología Molecular y Celular de Rosario (IBR) han logrado lo mencionado anteriormente por medio de la inserción de un gen bacteriano en el genoma vegetal, otorgando a la planta altos niveles de adaptabilidad.

Cuando no se garantizan las condiciones ambientales que la planta necesita se sacrifican muchos elementos como: calidad y dinero. La empresa MSC Invernaderos en su artículo “La Importancia de Cultivar en Invernadero” establece de manera muy acertada que: “dentro del invernadero obtendremos unas condiciones artificiales (microclima) que genera a las plantas una mayor productividad con un mínimo coste y en menos tiempo” (Grupo MSC, 2017). Lo anterior es muy importante porque presenta una oportunidad inigualable para las economías en vía de desarrollo, cualquier ahorro de dinero acompañado con eficiencia, es bien recibido en cualquier país.

¿De qué manera el proyecto propuesto contribuye a resolver esta problemática global? La mayor parte de los invernaderos son diseñados de manera que puedan otorgar ambientes óptimos, generalmente a gran escala. El control de variables ambientales posee un principio fundamental muy simple que gana complejidad dependiendo las condiciones y necesidades; no obstante, la complejidad es sinónimo de costoso afectando directamente el uso doméstico, comercialmente no todos proveen el control y monitorización de las variables ambientales, ¿Por qué? básicamente por la ausencia de precios accesibles. La organización experta en agricultura INTEREMPRESAS plantea en su artículo “Los invernaderos: estado de la tecnología”, todos los parámetros que debe llevar un invernadero con base en los avances tecnológicos vigentes, lo curioso es que ninguno de estos elementos parece ser incluido para recintos a pequeña escala (Fundación Cotec, 2009). En este contexto podemos inferir que en la mayoría de los lugares del mundo sufren de estos problemas, generalmente las plantas crecen en ambientes que no son los adecuados afectando su crecimiento y calidad; un producto fresco y bien desarrollado siempre será de mucho más valor económico (Royal Queen Seed, 2010).

Algunas ciudades de Colombia poseen condiciones ambientales muy peculiares, en el caso de la ciudad de Barranquilla se cuenta con un clima cálido y muy húmedo. Las temperaturas diurnas suelen permanecer alrededor de 32 °C; por otro lado, en Barranquilla no se producen las abundantes selvas características del clima tropical. Por el contrario, es una zona seca, como lo es todo el litoral Caribe colombiano, debido a que los vientos alisios del noreste soplan paralelos al litoral, absorbiendo la humedad, empujándola hacia el interior de la Región Caribe hasta las estribaciones de la cordillera de los Andes. Los vientos alisios son secantes y en determinadas épocas del año soplan con más energía, aumentando la sequía en la región (Universidad del Norte, 2010). Por consiguiente, el cultivo de plantas resulta ser una labor compleja sin un conocimiento adecuado.

1.2 Hipótesis

Es posible elaborar un invernadero automatizado para ambientes tipo indoor de bajo costo para el cultivo de plantas comestibles, con interfaz amigable con el usuario y con un uso eficiente del espacio.

1.3 Justificación

La industria de la agricultura es un pilar importante para la economía interna de los países ya que además de incrementar el producto interno bruto (PIB), también genera empleo y contribuye a la reducción de la inflación. En Colombia, se registraron cifras positivas en las exportaciones en el año 2017. Con un incremento del 7,2% respecto al año anterior. En palabras del, en aquel entonces, ministro de agricultura y desarrollo rural Juan Guillermo Zuluaga:

“Es importante que los productos del sector agropecuario sigan creciendo año tras año y buscando nuevos mercados, como ha sucedido en los últimos años. Este resultado de las

exportaciones muestra que hay apetito por los productos colombianos en el exterior” (Ministerio de agricultura, 2017).

Este incremento del 7,2% en las exportaciones agropecuarias con respecto al 2016 representa una cantidad de \$7.355,6 millones de dólares (USD) de los cuales el 55,4% hace referencia a las ventas de productos vegetales o de origen vegetal, o sea que el sector vegetal aportó unos 4.075 millones de dólares más al país con respecto al año 2016, sin embargo, la Región Caribe no representa un aporte significativo en el área agrícola ya que la mayor parte de estos alimentos son producidos en el interior del país donde se cuenta con las mejores condiciones para cultivar a cielo abierto, debido a ello el Departamento del Atlántico se ve obligado a importar una cantidad exagerada de alimentos de tipo vegetal; la directora de la Escuela Superior de Administración pública afirmó que “El 65% de los alimentos que consumen los habitantes de la Región Caribe, entre ellos fruta y verdura, son importados del interior del país” (Claudia Sarmiento, 2014).

Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2005) la expectativa de vida en Colombia va incrementando con el pasar de los años y las cifras de natalidad han mantenido una tendencia estable a lo largo de los años, por lo tanto, el país presenta una tendencia ascendente en su población, se prevé que la tendencia siga así por muchos años. Un problema claro es que según cifras DANE el área y volumen de producción de cultivo apenas ha variado un poco a lo largo de los años (SICNA, 2013) entonces se hace evidente la necesidad de incrementar el volumen de producción de forma sistemática para que cada persona en la Región Caribe y el resto del país donde no se cuenta con condiciones climáticas como las del interior sea capaz de satisfacer su demanda de frutas y verduras sin descuidar la economía y el medio ambiente siendo sostenibles y eficientes, ya que la forma de abastecer a la población sería

entonces incrementando las importaciones de frutas y verduras, importaciones que representan un agujero en el bolsillo de los ciudadanos debido a que tienen un valor agregado al ser productos comprados y que además deben ser transportados hacia su destino final usando medios de transporte que contaminan el medio ambiente.

El cultivo bajo invernadero es una estrategia usada en países desarrollados y que cada vez se hace más común en otros países de América Latina ya que este método ofrece una mejora significativa en la calidad de las frutas y verduras, además no es necesario contar con vastas extensiones de tierra ya que en 1 m² se puede cultivar una cantidad suficiente de frutas y verduras como para asegurar el consumo mensual de una persona (OMS, 2013). El invernadero ofrece un lugar con condiciones óptimas para las plantas favoreciendo su crecimiento y desarrollo lo que también se ve reflejado en la cantidad de producción de cultivo. En México se realizó la instalación de un invernadero con el objetivo de evaluar el potencial de rendimiento y calidad del fruto de 10 especies de tomate en invernadero de baja tecnología y las condiciones desérticas del noroeste de Sonora durante los años 2005 y 2006. Al final se demostró que fue posible el cultivo del tomate incluso en condiciones desérticas y que podían sostener una buena calidad año tras año. El estudio concluyó que “El análisis combinado de varianza para los dos años y para las variables de rendimiento y peso de fruto presentaron diferencias estadísticas significativas al 0.01 de probabilidad para años (A), híbridos (H) y en la interacción AxH. Los coeficientes de variación fueron de 7.2% para rendimiento y 3.2% para el peso del fruto” (Contreras, Duarte, & Contreras, 2011).

Por consiguiente, durante los dos años de experimentación, los tomates tuvieron un ciclo de vida y producción estable, además con características físicas muy parecidas como el peso y la forma. Pero ¿cuántas serían las personas que tendrían el tiempo para cultivar sus frutas y

vegetales?, según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2019), de todas las personas autorizadas para laborar en Colombia el 59.5% están trabajando formalmente y no tienen tiempo suficiente para cultivar, obviamente las personas no solo trabajan a lo largo del día sino que también desarrollan otras actividades, sin embargo hemos tomado como referencia el trabajo ya que esta es una actividad que el 90.9% de la población realiza y consume la mayor cantidad de tiempo dentro de todas las otras actividades que desempeñe la persona, dejando así al individuo con poco o nada de tiempo para cultivar. No obstante, en el mercado existen invenciones tecnológicas que permiten automatizar los procesos de “atención” que necesita la planta, y por ende ahorrar tiempo con una variedad de sensores y actuadores es posible proporcionarle a la planta dentro del invernadero la temperatura, luz y cantidad de agua que necesita para que esta se desarrolle correctamente y nos entregue una producción de buena calidad como lo expuesto en el artículo “Paquete tecnológico para el monitoreo ambiental en invernaderos con el uso de hardware y software libre” donde se dice que “El software libre permite el control de sensores que favorecen un ambiente controlado, que deriva en un mejor aprovechamiento de los recursos de energía, agua y productos químicos en beneficio de la calidad y cantidad de la producción” (Lugo Espinosa, Villavicencio Pérez, & Díaz Luna, 2014), en este diseño se plantea que la circuitería sea alimentada con energía fotovoltaica lo que elimina el consumo de electricidad adicional.

No se trata de acabar con la agroindustria, se busca que las personas interesadas en cultivar sus propios alimentos orgánicos y libres de pesticidas puedan hacerlo de forma sencilla, económica y además disminuyendo en gran medida la importación de estos alimentos.

El invernadero desarrollado en este proyecto resulta útil para aquellas personas que desean cultivar sus propios alimentos, pero tienen espacios reducidos para ello y no cuentan con

el tiempo o el conocimiento suficiente para controlar las variables ambientales que influyen en el crecimiento de las plantas.

A través de una aplicación móvil, las variables ambientales del invernadero serán visualizadas de forma organizada

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general.

- Construir un prototipo funcional de un invernadero automatizado de bajo costo, capaz de controlar variables de temperatura, iluminación y humedad en suelo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Buscar, seleccionar y organizar fuentes de información significativas, relacionadas con el desarrollo de invernaderos automatizados.
- Seleccionar e implementar los sensores adecuados para obtener el registro de mediciones inherentes al ambiente que se controlará.
- Diseñar y construir la estructura física y diferentes sistemas de censado para controlar el ambiente dentro del invernadero.
- Validar el diseño propuesto en el proyecto, por medio de la elaboración de pruebas a los diferentes sistemas de censado en el ambiente controlado.

1.5 Delimitación del proyecto

1.5.1 Alcance.

Se diseñará un prototipo funcional de invernadero para el cultivo de pequeñas plantas comestibles en ambientes indoor (situado dentro de un recinto o bajo cubierta), que crezcan en temperaturas entre los 24°C hasta los 38°C teniendo en cuenta un promedio de temperaturas máximas y mínimas a lo largo del día y del año en la región del caribe colombiano. Se controlará

de forma automatizada las variables de temperatura, iluminación y humedad del sustrato o suelo al interior del invernadero.

1.5.2 Limitaciones.

- Cultivar plantas tipo árbol.
- Refrigeración del fruto.
- Cultivar plantas que crezcan en temperaturas por debajo de la temperatura mínima que pueda ser proporcionada por el invernadero.

1.6. Estado del Arte

La presente revisión tuvo en cuenta investigaciones relacionadas con la automatización o inclusión de la robótica en los invernaderos, muchos artículos exponían características similares por lo que solamente se analizaron los más representativos; se utilizaron las bases de datos disponibles en la Universidad de la Costa, CUC. En la tabla 1 se expone un breve resumen del número de publicaciones y sus respectivas fuentes.

Tabla 1

Fuentes secundarias, bases de datos y su clasificación de acuerdo su relevancia.

Base de datos	Relevancia	Artículos Encontrados
Scopus	Media	6
IEEE	Alta	10
Science Direct	Alta	8
Web of Science	Media	3
Google Academic	Baja	4
Total		31

Fuente: Creación Propia.

1.6.1 Control y monitorización de los invernaderos.

El fundamento del sistema de control automatizado reside en el microcontrolador, existen muchos tipos de microcontroladores, pero el principio sigue siendo el mismo. Este elemento es el pilar básico en el control ambiental, consiste en manejar de forma adecuada todos aquellos

sistemas instalados en el invernadero: sistema de calefacción, sistema humidificador y de ventilación (para mantener los niveles adecuados de temperatura), humedad relativa y calidad del aire (B. García, Tutores, León, & Al-Hadithi Abdul Qadir, 2014). La comunicación de estos dispositivos se realiza a través de lógica; (Reyna Huamán, 2015) plantea en su investigación que actualmente existen tres tipos de algoritmos de control: control clásico, control inteligente, control difuso y red neuronal artificial.

Un ejemplo de lógica difusa reside en el sistema de (Kolokotsa, Saridakis, Dalamagkidis, Dolianitis, & Kaliakatsos, 2010), controlan las diferentes variables por medio de sistemas no lineales, permitiéndoles recibir mediciones sobre las variables de temperatura, cantidad del agua, el CO₂ y la luz al interior del invernadero.

1.6.2 Regulación de la humedad en el ambiente controlado.

Como lo plantea (Reyna Huamán, 2015) actualmente diversos sistemas y procesos se encuentran automatizados, es decir, se han aplicado sistemas mecánicos y electrónicos para controlar el proceso y no requerir intervención humana para su funcionamiento. Según la literatura existente, uno de los primeros proyectos que incluye la automatización en los invernaderos mediante robótica es el AGROBOT, desarrollado por (Buemi, Massa, Sandini, & Costi, 1996). El robot construido utiliza un brazo mecánico con seis grados de libertad, diseñado para recolectar tomates de manera automática y eficiente, evitando con esto el esfuerzo repetitivo que los trabajadores del invernadero tienen que hacer al recolectar estas verduras a mano y aplicar pesticidas (M. A. García, Gutiérrez, López, Rivera, & Ruiz, 2007). La ventaja de este sistema radica en que les facilita a los operarios diversas intervenciones, es cierto que el robot es aplicado para industrias grandes, no obstante, el principio de automatización es similar a lo que se quiere conseguir con el prototipo, al controlar la humedad del suelo.

(Reyna Huamán, 2015) enfocó su estudio a la humedad en los invernaderos propuso el diseño de un sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad de un invernáculo ubicado en el departamento de Áncash en Perú. Para tal fin, ella planteó una estrategia de control que permitió establecer un valor adecuado de humedad dentro del invernadero mediante un algoritmo de control ON/OFF, este ejecutaba una de las dos etapas de humidificación y deshumidificación, de acuerdo con la medición del sensor de humedad. En este trabajo se mencionan elementos clave para el funcionamiento del sistema, tenemos el sensor DHT22 para las mediciones de humedad y la tarjeta de comunicaciones Max 232 para el intercambio de datos y creación de interfaz.

1.6.3 Estructura del invernadero.

Las estructuras que se pueden utilizar en el diseño de un invernadero pueden variar, se infiere entonces, que cada diseñador utiliza la forma que más se ajuste a sus necesidades. Las estructuras de invernadero pueden ser sencillas, tipo artesanal (hechos con material y conocimiento locales) o más complejas, tipo industrial (altamente mecanizados y equipados) (Carlos, Hernández, & Pérez-parra, 1999).

Sin embargo, (Stanhill & Enoch, 1999) agrupó las estructuras de invernaderos acorde con características constructivas: geometría, pendiente de cubierta y orientación; material de cubierta: vidrio, plástico rígido, plástico flexible o combinaciones de ellos; material de construcción: acero, aluminio, madera o combinaciones de ellos. Desde otro ángulo, tenemos que el tipo de material que conforma la estructura condiciona la geometría y la altura del invernadero ya que debe de soportar diferentes cargas; no obstante, las formas que se utilizan más frecuentemente son: techos planos, techos planos simétricos a dos aguas, techos planos asimétricos, arco redondeado, arco en punta (von Elsner et al., 2000).

1.7 Diseño metodológico

El tipo de metodología empleada para el proyecto es la experimental, además de una metodología cuantitativa ya que se pretende confirmar la hipótesis por medio de mediciones controladas.

En este caso particular y debido al tipo de investigación, se utilizó fuentes de información científica; específicamente bases de datos de la Universidad de la Costa CUC. Estas fuentes de información son consideradas de tipo secundario.

1.7.1 Método de investigación.

En esta sección se destacan las estrategias y procedimientos empleados para lograr el correcto cumplimiento de los objetivos planteados en incisos anteriores.

En primer lugar, se estudió la forma en que las plantas son afectadas por el ambiente circundante; en nuestro caso, se seleccionó cierta población de plantas que no demostraban problemas de compatibilidad con el ambiente de la ciudad de Barranquilla, de ese selecto grupo se tomó una para posteriores pruebas y mediciones. Una vez obtenidas las variables que modificaban las características innatas de la planta, se procedió a buscar sensores que pudieran medir las diferentes magnitudes que estas variables podían arrojar; los sensores son populares en el mundo de la electrónica y su cobertura de variables atmosféricas es rica y abundante, especialmente, aquellos que se acoplan con la placa ARDUINO.

ARDUINO funciona como un sistema, un microcontrolador, cuyo objetivo es facilitar la automatización para cualquier persona que pueda aplicar la lógica para armar código, los sensores acoplados a este controlador a su vez forman sistemas que se pueden categorizar individualmente, en otras palabras, se tiene un sistema principal (placa ARDUINO) y distintos

subsistemas que controlan las variables ambientales descritas al principio de la sección. La ventaja reside en que la conexión de estos sistemas se puede alcanzar con varios parámetros lógicos establecidos por los mismos desarrolladores de la placa.

La instalación física de los sensores dependerá del diseño arquitectónico de la estructura donde se piensa controlar el ambiente, sin embargo, debido a que la estructura no contó con un tamaño considerable, se supone que las mediciones no deben ser perturbadas por la posición espacial del sensor. Finalmente, se probaron los diferentes sensores por medio de mediciones, y posteriormente se compararon con datos base.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Invernadero

La Enciclopedia Británica define a un invernadero como una construcción con paredes y techo transparentes o translúcidos, los cuales permiten el paso de los rayos solares para producir la fotosíntesis en plantas que las contienen. Los invernaderos han sido generalmente diseñados para la protección de plantas que se cosechan fuera de estación o no, las cuales no pueden soportar bajas temperaturas o congelamiento, protegiéndolas, sobre todo, del excesivo calor o frío (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2007).

La función principal de un invernadero es la de recrear las condiciones apropiadas para dar vida y generar la reproducción de plantas, ya sean comestibles (como frutales y verduras), o con fines medicinales. Para lograr lo anterior, (Sammons, Furukawua, & Bulgin, 2005) afirma que se necesitan simular condiciones fisicoquímicas óptimas de temperatura, bióxido de carbono y humedad (entre otras) para el adecuado cuidado y crecimiento que requieren dichas plantas.

2.2 ARDUINO

ARDUINO es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto (open-source) basado en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para estudiantes, diseñadores, y para cualquiera interesado en crear objetos o entornos interactivos. ARDUINO puede interpretar el entorno mediante la recepción de sus entradas desde una variedad de sensores y puede afectar su entorno mediante el control de transductores, luces, motores y otros artefactos. El Microcontrolador de la placa se programa usando el “ARDUINO Programming Language” (basado en Wiring1) y el “ARDUINO Development Environment” (basado en Processing2). Los proyectos de ARDUINO pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador, tableta o equipo móvil. Las placas se pueden ensamblar a mano o encargarlas preensambladas; el software se puede descargar gratuitamente. Los diseños de referencia del hardware están disponibles bajo licencia open-source, por lo que eres libre de adaptarlas a tus necesidades (Luis Thayer Ojeda, 2010).

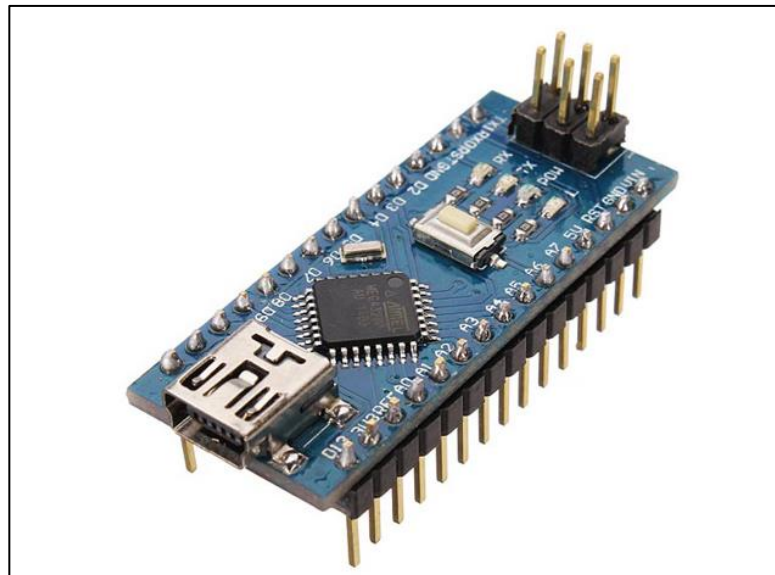


Figura 1. Microcontrolador ARDUINO Nano.

Fuente: (E-Shop, 2019)

En este caso, se utilizó el ARDUINO NANO para la gestión mencionada anteriormente; la razón principal reside en su pequeño tamaño y poder de respuesta.

2.2.1 Características del microcontrolador.

En esta sección se presenta las características técnicas del ARDUINO NANO:

Microprocesador ATmega328

- Architecture: AVR
- Operating Voltage: 5 V
- Flash Memory: 32 KB of which 2 KB used by bootloader
- Clock Speed: 16 MHz
- Analog IN Pins: 8
- EEPROM: 1 KB
- Input Voltage: 7-12 V
- Power Consumption: 19 mA
- PCB Size: 18 x 45 mm
- Weight: 7 g

2.3 Humedad del suelo

La humedad es importante para que la fotosíntesis sea posible. En el caso de los invernaderos, una buena humedad alrededor de la planta es todavía más importante que en otras condiciones, porque la planta únicamente puede absorber una pequeña cantidad de agua y, por tanto, evapora menos agua. Si la planta pierde demasiada agua, las estomas se cerrarán, lo cual provocará que la fotosíntesis se frene. Si esto sucede, no podrá absorber más CO₂, y el CO₂ es necesario para mantener en marcha la fotosíntesis (FAO, 1999).

2.4 Temperatura ambiente

La temperatura es un elemento esencial en el cultivo y desarrollo de las plantas, afecta a la planta tanto a corto como a largo plazo.

La mayoría de los procesos biológicos se acelerarán con temperaturas altas, lo cual puede ser tanto positivo como negativo. Un rápido crecimiento o producción de frutos es un beneficio en la mayoría de los casos, sin embargo, la excesiva respiración que se produce es desfavorable porque implica que quedará menos energía disponible para el desarrollo de los frutos, resultando en unos frutos más pequeños (Canna Research, 2003).

Otro aspecto relacionado con la temperatura es el crecimiento de las raíces, debido a que en esta parte ocurre la síntesis de hormonas y otras sustancias, (Fischer, 2014) afirma: “La temperatura de la zona radical tiene efectos marcados sobre el crecimiento y desarrollo de la planta. En general, el crecimiento y desarrollo de la planta aumenta al incrementar la temperatura hasta un máximo entre 25° y 35° C dependiendo la especie”.

2.5 Iluminación

Las plantas necesitan mayoritariamente de luz y agua, para realizar la fotosíntesis; sin embargo, las cantidades pueden variar según cada especie: existen plantas que necesitan mucha cantidad de luz, mientras que otras se arreglan con muy poca. (López, 2017) en su artículo “*La importancia de la luz en las plantas*” asegura que tanto el exceso como la falta de luz ocasionan consecuencias negativas, demasiada luz provoca que las hojas pierdan el tono verde y se tornen blanquecinas, con bordes amarronados y manchas pardas. Cuando, por el contrario, la planta recibe menos luz de lo que necesita, la planta se ve débil. Florecen poco y las flores son muy pequeñas se caen antes de haber completado su desarrollo. Los tallos son débiles y delgados, y las hojas se ponen amarillas y se caen enseguida.

2.6 Fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo es una característica crucial para el buen desarrollo de las plantas, un suelo fértil ofrece los nutrientes y minerales necesarios para estos organismos puedan realizar todos sus procesos vitales; un suelo fértil contiene los siguientes nutrientes: fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl); elementos como el carbono (C), dióxido de carbono (CO₂), hidrogeno (H) y oxígeno (O) están presentes en el aire y el agua (IFA, 1992). Un suelo fértil afecta el crecimiento de las raíces de la planta, como se puede apreciar en la figura 2.

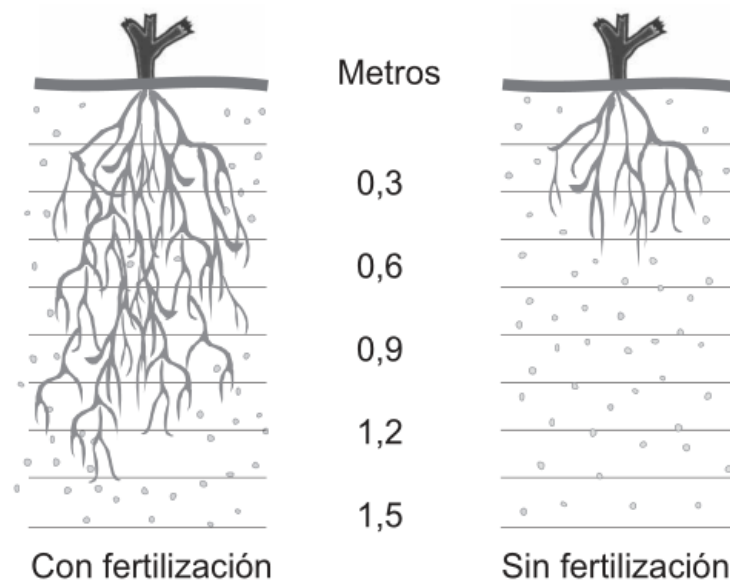


Figura 2. Profundidad de las raíces de las plantas con y sin fertilización.

Fuente: (IFA, 1992)

Los suelos pueden ser modificados de manera significativa con la adición de fertilizantes, productos comercializados que agregan de manera no natural los nutrientes (mencionados en el párrafo anterior) para que la planta se desarrolle de manera óptima.

Capítulo 3. Desarrollo e implementación del proyecto

En esta sección se presentan las diferentes etapas, métodos y cálculos realizados para la implementación del proyecto, teniendo en cuenta las características mencionadas en secciones anteriores. Además, se muestran mediciones obtenidas a partir de pruebas realizadas en condiciones específicas; para el desarrollo final del presente proyecto fueron necesarios el diseño e implementación de 2 prototipos.

3.1 Diseño metodológico del proyecto

El desarrollo del prototipo final del invernadero está comprendido en tres etapas en las que se desarrollaron diferentes actividades. La tabla 2 muestra las etapas de desarrollo y las actividades asociadas.

Tabla 2
Etapas de diseño e implementación del prototipo final.

Etapas	Procesos	Actividades
Etapas I	Diseño del sistema de medición y control	Selección de variables a controlar.
		Selección del microcontrolador y sensores.
		Diseño del sistema de control principal y subsistemas.
Etapas II	Diseño e implementación de la estructura física y electrónica del prototipo final	Diseño de la estructura física y de tarjetas electrónicas.
		Selección de materiales para la construcción del prototipo final.
		Montaje físico de los elementos del sistema de control.
		Programación del microcontrolador.
Etapas II	Mediciones y pruebas	Prueba individual de los diferentes subsistemas.
		Prueba conjunta del sistema de control.

Fuente: Creación Propia.

Dos modelos previos al resultado final son presentados, mostrando las mejoras para llegar al prototipo final, como también los materiales constructivos y los sensores escogidos para la medición.

3.2. Etapa I: Diseño del sistema de medición y control

3.2.1 Selección de variables a controlar.

Las variables que afectan principalmente el crecimiento de las plantas son cuatro: luz solar, temperatura, humedad y fertilidad del suelo. La alteración de cualquiera de estas variables puede convertirse en una limitación para el crecimiento de la planta si llega estar por fuera del rango tolerable del organismo vegetal (Fischer, 2014).

La luz solar permite a las plantas realizar el proceso de fotosíntesis mediante el cual la planta produce su propio alimento ya que son seres autótrofos (Digfineart, 2018). La temperatura es un factor que se considera importante también, ya que las células vegetales no pueden tolerar temperaturas “extremas” como el frío o el calor excesivo, debido a que están compuestas en su mayoría por agua (BioEnciclopedia, 2010). La fertilidad del suelo es una característica relevante que está relacionada directamente con los nutrientes que necesitan las plantas para sobrevivir, se puede lograr una buena fertilidad adicionando químicos a la tierra o en muchos casos resulta ser una cualidad innata del terreno como lo afirma (IFA, 1992) en “World Fertilizer use Manual”, Si el suministro de nutrientes en el suelo es amplio, los cultivos probablemente crecerán mejor y producirán mayores rendimientos. Sin embargo, si aún uno solo de los nutrientes necesarios es escaso, el crecimiento de las plantas es limitado y los rendimientos de los cultivos son reducidos. En consecuencia, a fin de obtener altos rendimientos, los fertilizantes son necesarios para proveer a los cultivos con los nutrientes del suelo que están faltando. Con los fertilizantes, los rendimientos de los cultivos pueden a menudo duplicarse o más aún triplicarse (Amésquita et al., 2001).

Para el desarrollo del presente invernadero se midió y controló la incidencia de la luz solar sobre la planta, la temperatura al interior del invernadero y la humedad del suelo, sin embargo,

dado que no existe una forma de medición directa del nivel de “nutrición” del suelo, se determinó que la fertilidad del suelo no será controlada. Se le sugiere al usuario utilizar un sustrato enriquecido para el cultivo.

3.2.2 Selección del microcontrolador y sensores.

Las mediciones de temperatura, humedad del suelo e iluminación son administradas por un sistema principal de control (ARDUINO), el cual a su vez controla diferentes subsistemas. Estos subsistemas están compuestos por sensores electrónicos y actuadores mecánicos (bomba de agua sumergible) y eléctricos (conjunto de luminarias led), que preservan las condiciones predeterminadas del ambiente. Los subsistemas son: sistema de riego, sistema de iluminación, y el sistema de ventilación.

Una vez establecidas las variables a controlar dentro del invernadero, las cuales son temperatura, nivel de luminosidad y humedad del suelo, se procedió con la selección de sensores que tuviesen características compatibles con la plataforma ARDUINO, para lo cual se ingresó a la página web <https://www.ARDUINO.cc/> en donde nos fue posible seleccionar los sensores requeridos para medir cada una de las variables.

3.2.3 Subsistema de riego.

El subsistema de riego controla la humedad del suelo y está compuesto por un higrómetro, (sensor de humedad) una motobomba, una manguera con sus respectivos difusores de aspersion y un tanque donde se almacena el agua para irrigar el sustrato o tierra.

El higrómetro realiza mediciones directas de la humedad del suelo, si la humedad del suelo se encuentra dentro del rango establecido en el sistema a través de programación, el sistema no realiza ninguna maniobra correctiva. Por el contrario, si la humedad del suelo se

encuentra por debajo del rango, el controlador ARDUINO activa la motobomba que transporta el agua desde la cisterna hasta la manguera de irrigación. La motobomba se desactiva cuando el suelo alcance la humedad deseada. Además, la motobomba está protegida por un sistema de seguridad (*ver 3.2.3.4 Subsistema de control de nivel*) que evita que su accionamiento si el tanque no cumple con los niveles de llenado requeridos. Esta medida fue necesaria debido a las condiciones de uso de la motobomba, si esta es accionada sin agua en su interior la parte mecánica podría sufrir daños irreparables.

El higrómetro empleado para medir la humedad del suelo es el SKU (SEN0114) La figura 3 muestra el módulo SKU (SEN0114).

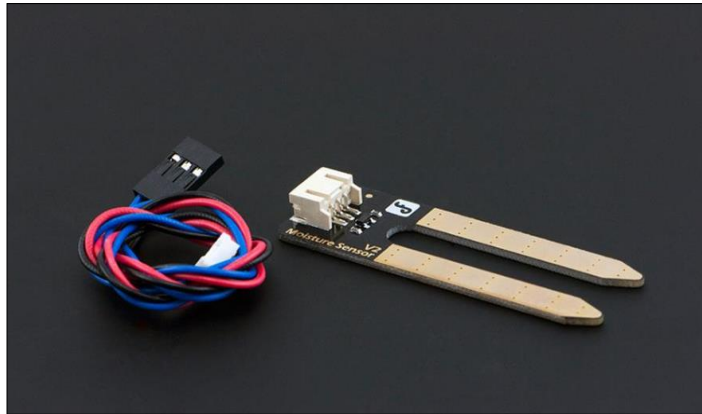


Figura 3. Módulo ARDUINO SKU (SEN0114).

Fuente: (DFRobot, 2016).

El módulo SKU (SEN0114) puede leer la cantidad de humedad presente en el suelo que lo rodea. Es un sensor de baja tecnología, pero es ideal para el seguimiento de un jardín urbano o un cultivo. Se trata de una herramienta indispensable para saber el estado de humedad del suelo. Cuenta con dos sondas para pasar corriente eléctrica a través del suelo circundante, y luego lee la resistencia para obtener el nivel de humedad. Más agua hace que el suelo conduzca la

electricidad con mayor facilidad (menos resistencia), mientras que el suelo seco es un mal conductor de la electricidad (más resistencia) (Perea Palacios, 2016).

Características del módulo SKU (SEN0114).

- Fuente de alimentación: 3,3 V o 5 V
- señal de tensión de salida: 0 ~ 4.2v
- Corriente: 35 mA
- Tamaño: 60x20x5mm (2.36x0.79x0.2 ")
- Acabado superficial: Oro de la inmersión.

3.2.3.1 Bombeo de agua.

El bombeo desde el tanque hasta el cultivo se lleva a cabo gracias a la unión de una bomba de agua para peceras y un complejo de tubos PVC flexibles que transportan el agua hacia el punto final. El funcionamiento óptimo de la bomba es bajo el agua, por consiguiente, es de suma importancia que el tanque mantenga un nivel específico. Cabe resaltar, que la elección del tamaño del tanque puede ser escogida por el usuario y por el espacio disponible en su vivienda o lugar de ubicación del invernadero; para el presente proyecto se utilizó un tanque de 1 L. Las figuras 4 y 5 muestran respectivamente, la bomba y el tubo utilizado para el bombeo del agua hacia el cultivo.



Figura 4. Bomba De Agua Para Fuente (PF-228).

Fuente: (MercadoLibre, 2018a)

Características de la bomba de agua (PF-228).

- Totalmente sumergible, 110 Voltios, 5 watts, capacidad de 220 L/H.
- Ideal para fuentes de tamaño pequeño.
- Tamaño: 49mm X 44mm X 45mm
- Altura del agua mínima: 30 cm



Figura 5. Tubo de vinilo transparente manguera.

Fuente: (MercadoLibre, 2018b)

3.2.3.2 Método de regado del cultivo.

El método de regado de cultivos utilizado para el prototipo final fue por goteo, por que ofrecía un flujo constante de agua en cantidades que la bomba podía manejar durante un tiempo prolongado. (Paz, 2015) en su manual de capacitación presenta un resumen relevante del método:

Los sistemas de riego por goteo permiten conducir el agua mediante una red de tuberías y aplicarla a los cultivos a través de emisores que entregan pequeños volúmenes de agua en forma periódica. El agua se aplica en forma de gota por medio de goteros. Es un sistema presurizado donde el agua se conduce de manera uniforme y con alta frecuencia por lo que se puede mantener una humedad constante durante todo el cultivo. (p.3)

En el prototipo final, los goteros fueron elaborados de manera artesanal con perforaciones de por lo menos 2 mm de diámetro, estos agujeros simularon a la perfección las gotas características del método de regado mencionado en párrafos anteriores.

3.2.4 Subsistema de Iluminación.

El sistema de iluminación se encarga de tomar mediciones constantes de la radiación electromagnética que incide en el invernadero con el fin de comparar el valor medido con un valor establecido mediante la programación, siendo el valor establecido de iluminación un rango óptimo de radiación que le permite a la planta desarrollarse de la mejor forma. Para ello, mediante la programación se ha establecido que si a la planta le hace falta “luz” esta le será proporcionada artificialmente por bombillas LED.

La medición de iluminación se realiza por medio de un LDR (Light-Dependent Resistor), el cual es un resistor que varía su resistencia eléctrica de acuerdo con luz que incide sobre él. A través de elemento se mide la cantidad de luz que incide sobre una superficie por medio de conversores de valores analógicos a digitales de la tarjeta ARDUINO. La figura 4 muestra un LDR analógico.

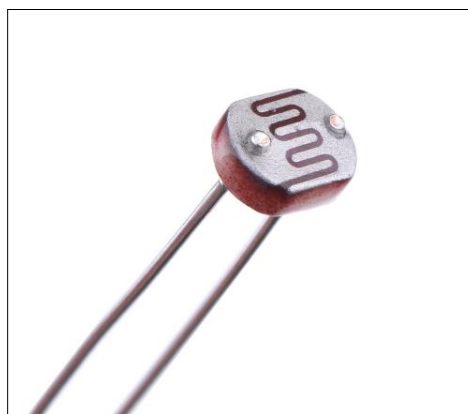


Figura 6. LDR analógico.

Fuente: (Perea Palacios, 2016; Voltage, 2009).

Las características del LDR son las siguientes:

- Capaz de detectar la luminosidad ambiente y la intensidad de la luz
- Sensibilidad ajustable (mediante potenciómetro digital)
- Tensión de funcionamiento 3.3V-5V
- Salidas de conmutación digitales (0 y 1) -D0
- Tamaño pequeño placa PCB: 3cm * 1.6cm

3.2.4.1 Rotación de las luces artificiales.

Teniendo en cuenta el posible crecimiento inminente y la ubicación de las plantas dentro del ambiente controlado fue necesario idear una manera de que la luz artificial ofreciera todo su potencial lumínico en todas las etapas de desarrollo del cultivo. En este orden de ideas, se diseñó e implementó dos barras giratorias situadas de manera paralela una de la otra en dos paredes enfrentadas de la estructura. El anterior arreglo permite que las luces, que se encuentran sujetas a estas barras, puedan girar y, por consiguiente, cambiar el ángulo de exposición de la luz en el cultivo; el prototipo final puede cambiar su ángulo de exposición de 0 – 180° con respecto al suelo del invernadero, como se puede observar en la figura 7.

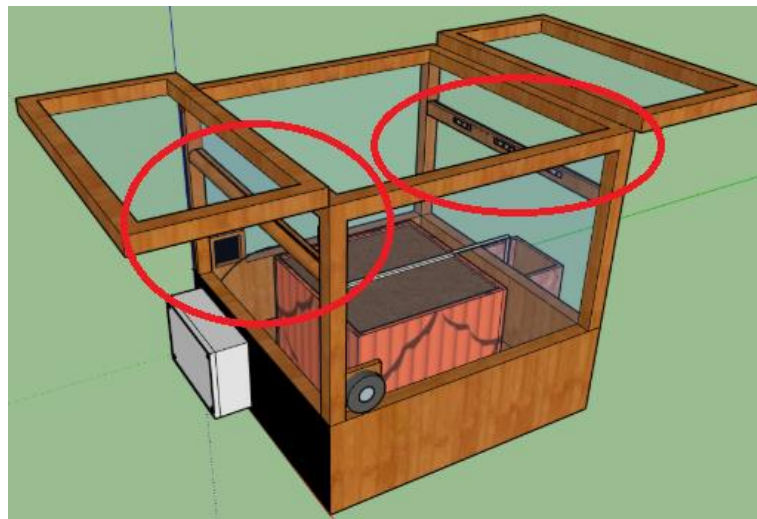


Figura 7. Barras rotativas de iluminación.

Fuente: Creación Propia

3.2.5 Subsistema de ventilación

El sistema de ventilación se encarga de recolectar información a través de mediciones de temperatura y humedad del aire en el invernadero, con el fin de mantener un monitoreo regular de las variaciones que se pueden presentar durante el crecimiento del cultivo. El sistema está conformado por el sensor DTH11 y por dos abanicos cuyo fin es recircular el aire del ambiente y disminuir las emisiones de CO₂. Es de suma importancia recalcar que, este sistema no está diseñado para la disminución masiva de la temperatura, sino para reducir la brusquedad con la que un gradiente positivo de temperatura pueda impactar a la planta, el sistema reduce el incremento de temperatura por medio de convección. Además, se hace recircular el aire dentro del invernadero, de esta manera, la temperatura se mantiene constante y el aire limpio de cualquier sustancia que la planta libere como el CO₂.

El sensor DHT11 es un dispositivo utilizado para medir digitalmente temperatura y humedad del aire. Este elemento utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor con los cuales obtiene las magnitudes de los parámetros a medir, además muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no hay pines de entrada analógica). Como lo plantea (Perea Palacios, 2016) en su tesis, el dispositivo es bastante simple de usar, pero requiere sincronización cuidadosa para tomar datos. La resolución temporal mínima del dispositivo es 2 segundos. La figura 5 muestra el módulo ARDUINO DTH11.

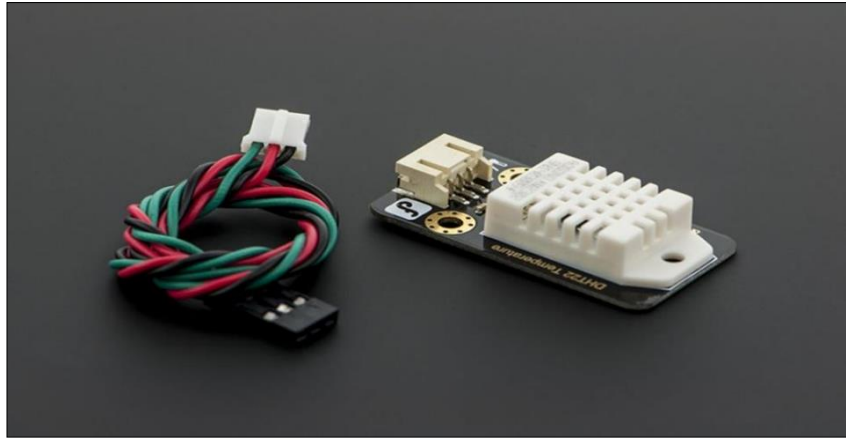


Figura 8. Módulo ARDUINO DTH11.

Fuente: (Mouser Electronics, 2011)

3.2.5.1 Características del sistema de ventilación.

Como se mencionó en la sección anterior, el prototipo final posee dos ventiladores ubicados de manera paralela, un ventilador impulsa aire hacía el interior y el otro lo extrae, es decir, un sistema de ventilación mecánico impulsión - extracción. Además, con el fin de obtener un barrido del espacio adecuado las entradas y salidas se dispondrán de tal modo que el aire que entra recorra la mayor parte del espacio a ventilar, antes de llegar a la salida, como se puede observar en la figura 8.

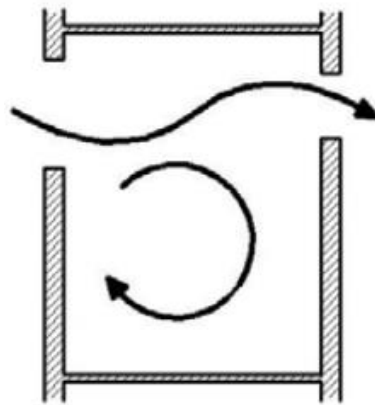


Figura 9. Barrido del espacio.

Fuente: (Universidad Politécnica De Madrid, 2003)

Para la impulsión – extracción en el prototipo final, tanto la entrada como la salida del aire se deben efectuar por medios mecánicos, como se puede observar en la figura 9. Esta entrada y salida de aire genera una circulación que expulsa gases propios de los cultivos tales como el CO_2 .

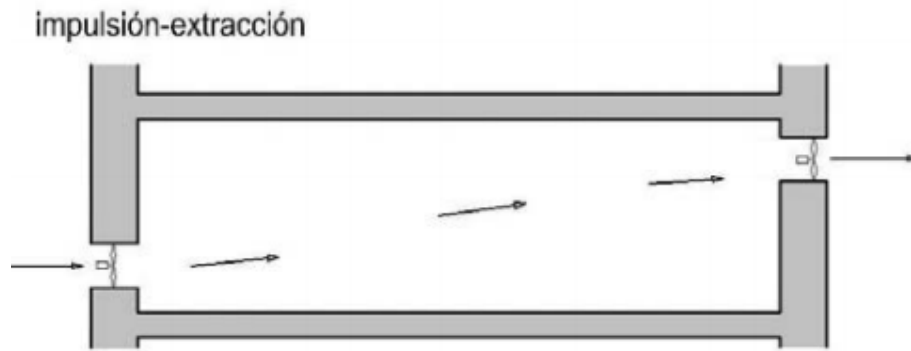


Figura 10. Sistema de ventilación impulsión – Extracción.

Fuente: (Universidad Politécnica De Madrid, 2003)

Asimismo, el sistema proporciona la llamada ventilación convectiva, que permite reducir el incremento de la temperatura al interior del invernadero, evitando así la sofocación del cultivo, como se muestra en la figura 11.

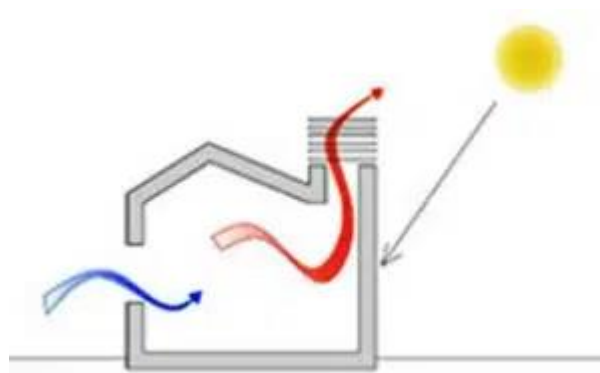


Figura 11. Circulación de aire en el prototipo final.

Fuente: (Juan León Vázquez, 2013)

3.2.6 Subsistema de control de nivel.

El invernadero cuenta con un sistema de control de nivel el cuál evita que la bomba se accione cuando el tanque de agua o cisterna esté a punto de vaciarse, con el fin de evitar que la bomba trabaje en vacío y sufra daños irreparables. El sistema está compuesto de un circuito integrado ULN2803, el cual se encarga de realizar la medición del nivel, por medio del código de programación se estableció que la bomba no pueda ser encendida, esto se hace utilizando un condicional (if) que permite establecer las acciones a realizar teniendo el estado de otra variable.

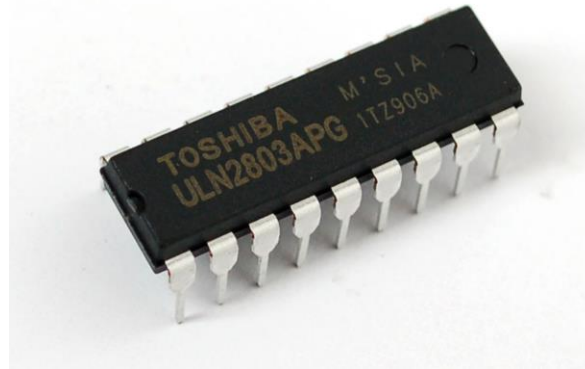


Figura 12. Sensor de nivel ULN2803A

Fuente: (Bigtronica, 2017)

3.2.6.1 Principio de funcionamiento.

Cuando los terminales Input (1,2,3,4,5,6,7,8) se conectan a una tensión positiva de entre 3 y 5 voltios, los transistores conducen y quedan eléctricamente conectados los terminales Output (18,17,16,15,14,13,12,11). Cuando retiramos la tensión positiva del terminal Input, los transistores dejan de conducir y la salida no tiene corriente.

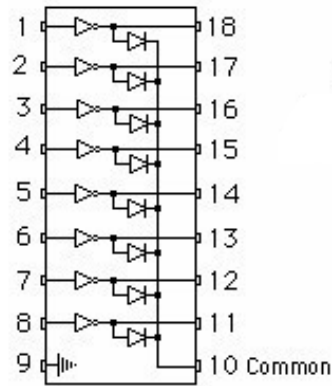


Figura 13. Esquema interno del ULN2803.

Fuente: (Hernández, 2015)

Para la implementación del subsistema de nivel en el prototipo final solo se utilizaron los siguientes puertos: Input (1 – 2), Output (18 – 17), tierra (9) y entrada de corriente (10). La entrada 1 y 2 se encuentran en contacto directo con el agua, con una separación de 30 cm, localizándose el conductor del puerto 1 en el fondo del tanque. Cuando no existe continuidad en el circuito se energiza el Buzzer.

3.2.6.2 Subsistema de alerta – Ausencia de agua en tanque.

El sistema de control de nivel está equipado con un Buzzer, cuya misión es emitir un sonido de advertencia cuando el nivel de agua sobrepase valores críticos de llenado. El Buzzer se encuentra ubicado en la caja de circuitos junto al tanque de agua, la emisión del sonido de advertencia ocurre cuando el agua está por debajo de 15 cm; el valor limite fue seleccionado teniendo en cuenta las características optimas de funcionamiento de la bomba. El Buzzer está conectado al integrado ULN2803, que se acciona cuando no existe continuidad en el circuito entre el integrado y el agua.



Figura 14. Buzzer activo utilizado en el sistema de alertas.

Fuente: (Bigtronica, 2017)

3.2.7 Subsistema de control de tiempo.

Además de todos los subsistemas de medición mencionados con anterioridad, el sistema de control cuenta con un reloj que registra hora y fecha, el registro de hora fue implementado con el propósito de establecer rutinas horarias de funcionamiento. En la figura 15 se puede apreciar el sensor utilizado para esta tarea, en posteriores secciones se entrará más en detalle sobre las rutinas y su interacción con todos los subsistemas.



Figura 15. Módulo DS3231 / AT24C32 Reloj.

Fuente: (Ferretrónica, 2019)

Las principales características del módulo DS3232 son:

- Voltaje de Alimentación: 3.3V ~ 5V

- Integrado Principal: DS3231
- Incluye memoria AT24C32 (Dirección por defecto es 0x57)
- Capacidad de memoria: 32K

3.2.8 Diseño del circuito para el sistema de control.

El sistema de control sigue una lógica de control cíclica programada en el ARDUINO para realizar todas las acciones necesarias para la automatización del invernadero, en la figura 16 se presenta dicha lógica.

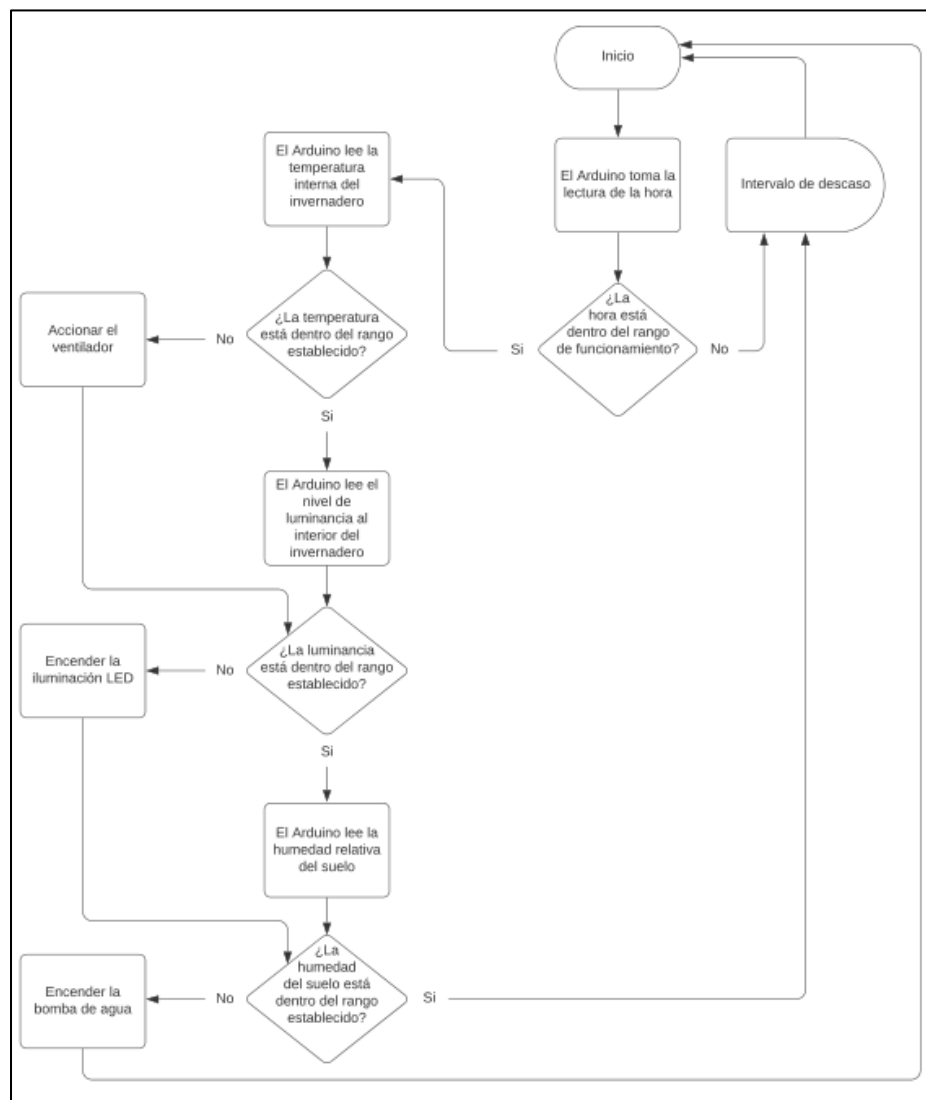


Figura 16. Diagrama de flujo programado para el sistema de control.

Fuente: Creación Propia.

El sistema de control principal es el cerebro del invernadero, este se encuentra constituido por el ARDUINO, este a su vez, recibe todas las mediciones y gestiona el funcionamiento de los distintos actuadores mecánicos y eléctricos; mediante este sistema primario se puede estandarizar datos y establecer órdenes para cada uno de los subsistemas. En este caso particular, se utiliza un sistema de control de **lazo cerrado o feedback**, en otras palabras, las señales de salida de los diferentes sensores pueden modificar las señales emitidas desde el ARDUINO. En la figura 17, se presenta el diagrama de conexiones del sistema de control principal, diseñado en el software Proteus.

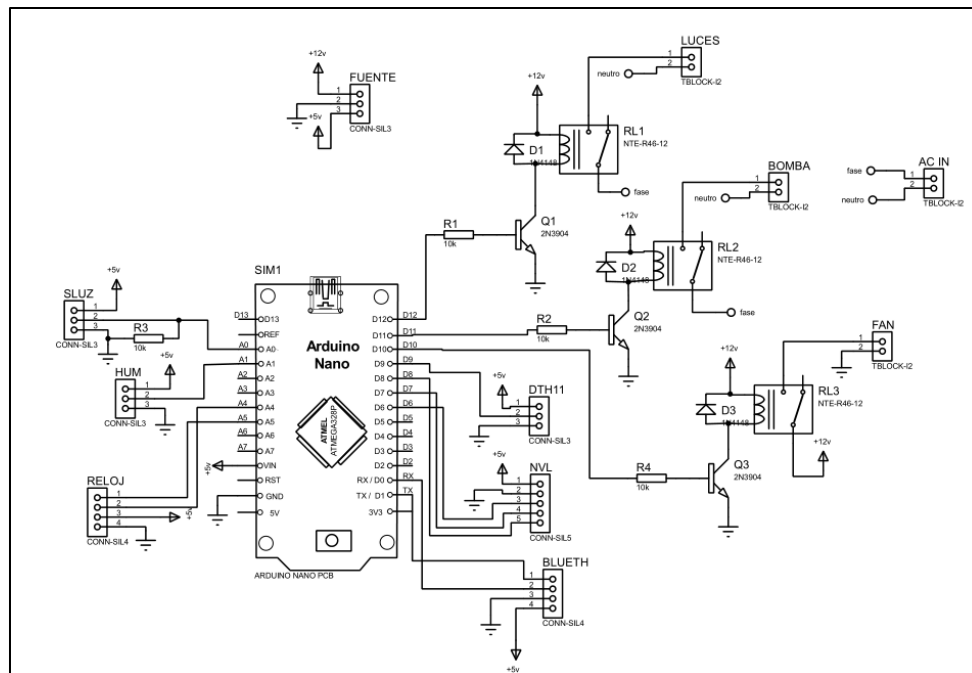


Figura 17. Diagrama electrónico del sistema de control – Proteus.

Fuente: Creación Propia.

Algunos comportamientos preestablecidos en la programación de este sistema relacionan varios subsistemas, sin embargo, estos pueden trabajar de manera independiente, es decir, si alguno de los subsistemas falla, los demás no se verán afectados; por otro lado, si el sistema principal tiene dificultades todo el complejo sistemático también las presentará.

3.3 Etapa II: Diseño e implementación de la estructura física y electrónica del prototipo final

En esta etapa se presenta el desarrollo e implementación física y electrónica de los prototipos 1, 2 y final, sus características y los resultados obtenidos en cada uno de estos.

3.3.1 Prototipo 1.

El primer prototipo contaba con paredes de vidrio, las cuales estaban unidas entre sí, gracias al uso de un pegante especial. El vidrio fue seleccionado por su buen coeficiente de transferencia de calor y por su robustez; no obstante, su peso generó un problema de movilidad, así como también, su tendencia a quebrarse con toques moderados. El sistema de riego implementado constaba de pajillas unidas con silicona en la parte superior del invernadero, en la parte lateral se encontraba un recipiente que contenía el agua utilizada para el riego; cómo se puede observar en la figura 18 el sistema de pajillas estaba adherido al invernadero con plastilina, lo que incrementaba la fragilidad del prototipo.



Figura 18. Imagen representativa del prototipo 1.

Fuente: Propia

Gracias a las mediciones obtenidas y a la literatura revisada, se comprendió que el mejor modo de riego es por goteo a nivel del suelo. La iluminación fue incluida de manera rudimentaria con LED'S de color azul, estas bombillas se encontraban todo el tiempo encendidas sin ningún tipo de control, por lo que las hojas de la planta se secaron prematuramente. Finalmente, las fallas obtenidas fueron anotadas y subsanadas en el prototipo 2. La tabla 3 muestra los sistemas instalados en el prototipo 1.

Tabla 3
Características principales del prototipo 1.

Ambiente controlado		
Control	Subsistemas	Características
ARDUINO MEGA	Riego	Bomba rudimentaria - Sistema de pajillas superior
	Iluminación	LDR - Luces construidas artesanalmente
	Ventilación	No presenta sistema de ventilación

Fuente: Creación Propia.

3.3.2 Prototipo 2.

El segundo prototipo contaba con 6 vigas de madera, entre cada viga había una capa de acetato cortado a la medida. El acetato fue seleccionado por su maleabilidad y su gran resistencia; no obstante, los cambios de temperatura reducían su tamaño considerablemente. No poseía un sistema de riego automatizado; su sistema de iluminación cumplía con las expectativas propuestas, luces azules con una inclinación de 45° hacia el suelo del invernadero. Como se puede observar en la figura 19 la estructura contaba con una tapa superior móvil, esta tapa, tenía una inclinación, adoptada por estética. El problema que presentaba este prototipo era el material de recubrimiento y la posición de las vigas de madera. La tira de madera que estaba en el medio obstruía la luz y generaba inconvenientes para el manejo de las macetas interiores del invernadero.



Figura 19. Imagen representativa del prototipo 2.

La tabla 4 presenta de manera concreta las características principales del prototipo 2:

Tabla 4

Características principales del prototipo 2.

Ambiente controlado		
Control	Subsistemas	Características
ARDUINO MEGA	Riego Iluminación Ventilación	No presenta sistema de riego automático Módulo BH1750 - Luces construidas artesanalmente Abanico de 12V

Fuente: Creación Propia.

3.3.3 Prototipo final.

El prototipo final del invernadero corresponde al tercer modelo. La tabla 5 presenta las características del prototipo 3.

Tabla 5

Características principales del prototipo final.

Ambiente controlado		
Control	Subsistemas	Características
ARDUINO NANO	Sistemas controlados por horarios preestablecidos Riego Iluminación Ventilación	Sistema de bombeo con riego automatizado por goteo LDR - Módulos de luces rotacionales 2 abanicos de 12V girando en sentido opuestos para generar circulación de aire externo.

Fuente: Creación Propia.

3.3.3.1 Diseño de la estructura física.

El diseño planteado para la construcción del prototipo final se muestra en las figuras 20, 21 y 22. La estructura tiene dimensiones de 60 x 60 cm, con columnas de 3 cm de grosor (forma cuadrada) cada una, por lo que cuenta con un área útil de aproximadamente 48 cm². Las puertas superiores son de 30 x 60 cm cada una; cuenta con una pared “hueca” (paredes paralelas con 5 cm de separación) que contiene todo el cableado, sí que este sea visible, posee una altura de 25 cm.

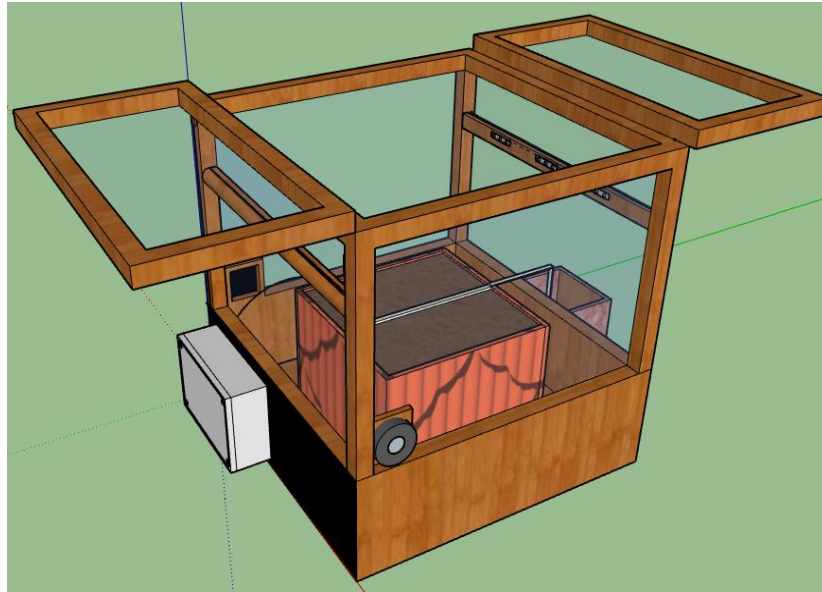


Figura 20. Vista frontal del prototipo final.

Fuente: Creación Propia.

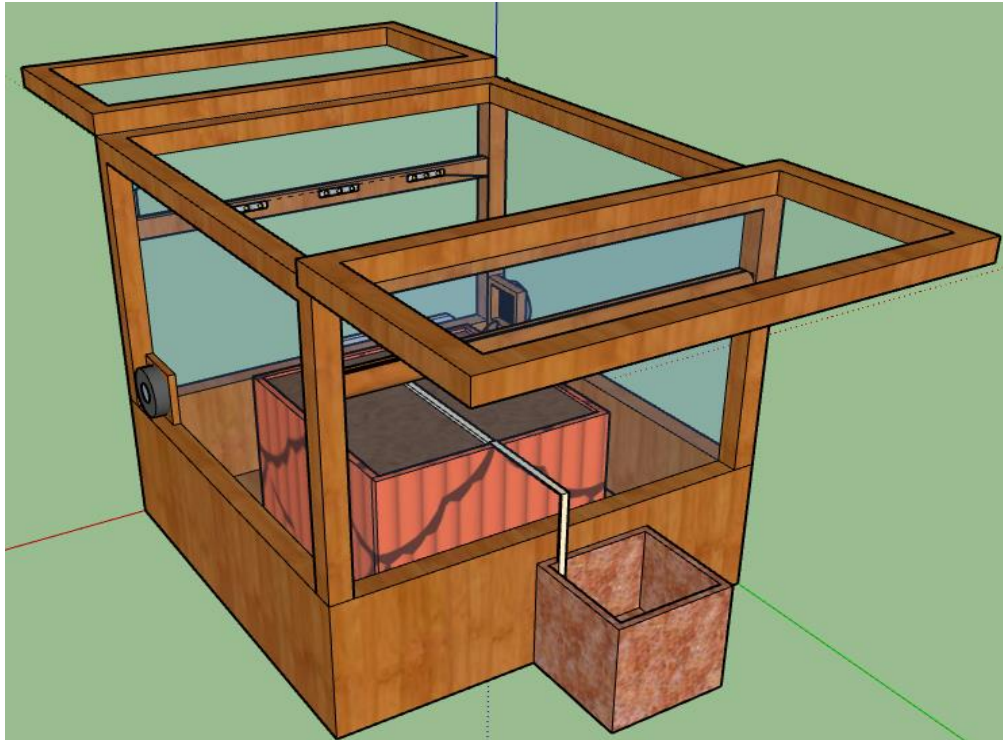


Figura 21. Vista lateral derecha del prototipo final.

Fuente: Creación Propia.

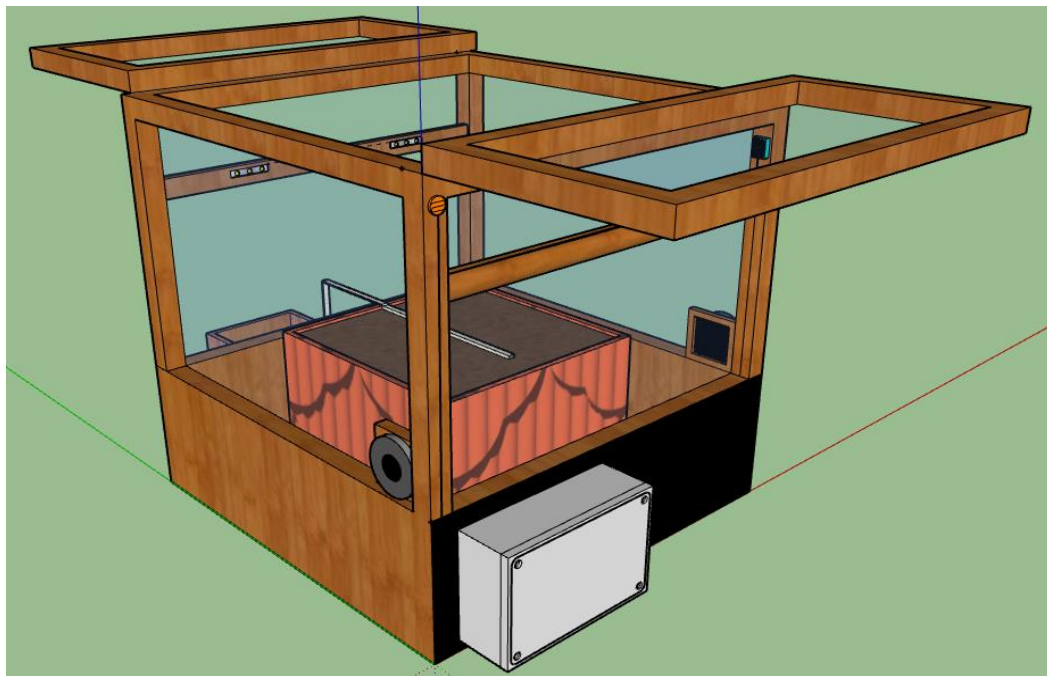


Figura 22. Vista lateral izquierda del prototipo final.

Fuente: Creación Propia.

3.3.3.2 Partes del prototipo final.

En esta sección se presenta las partes primordiales y su respectiva ubicación en el prototipo final, en la figura 23 se encuentra enumerado cada uno de estos elementos.

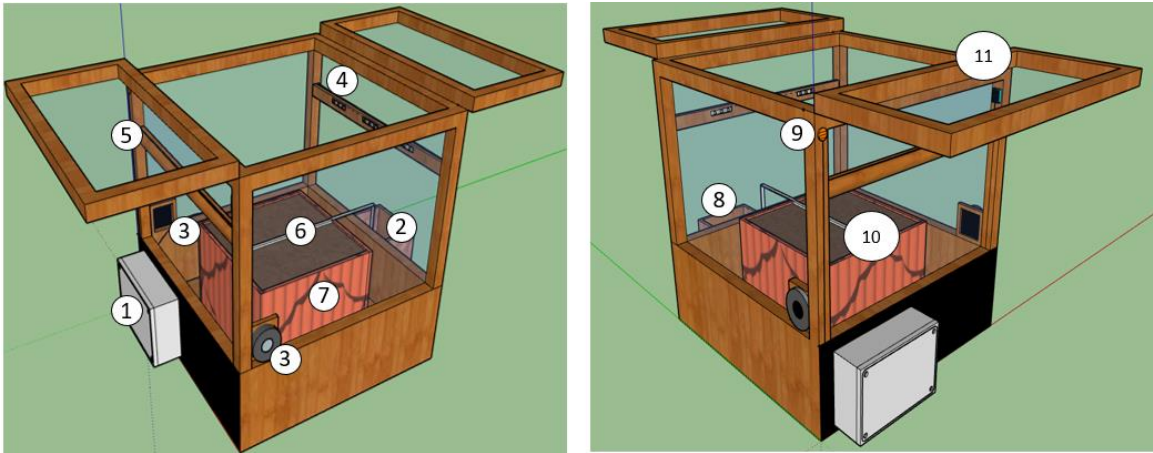


Figura 23. Partes del prototipo final.

Fuente: Creación Propia.

En la tabla 6 se puede apreciar el nombre de cada uno de ellos.

Tabla 6

Partes del prototipo final.

Partes del invernadero	
Número	Nombre del elemento
1	Caja de circuitos
2	Tanque - Suministro de agua
3	Ventiladores
4	Luces artificiales
5	Barra giratoria
6	Manguera transportadora de agua
7	Cultivo
8	Bomba de agua
9	LDR
10	Sensor de humedad
11	Sensor de temperatura

Fuente: Creación Propia.

3.3.3.3 Diseño electrónico del sistema de control.

La figura 24 y 25 presentan la parte superior e inferior del diseño electrónica utilizando el software Proteus.

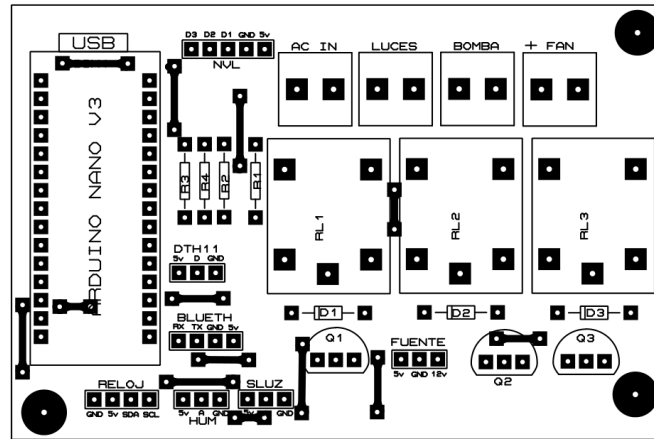


Figura 24. Cara superior del diseño electrónico – Proteus.

Fuente: Creación Propia.

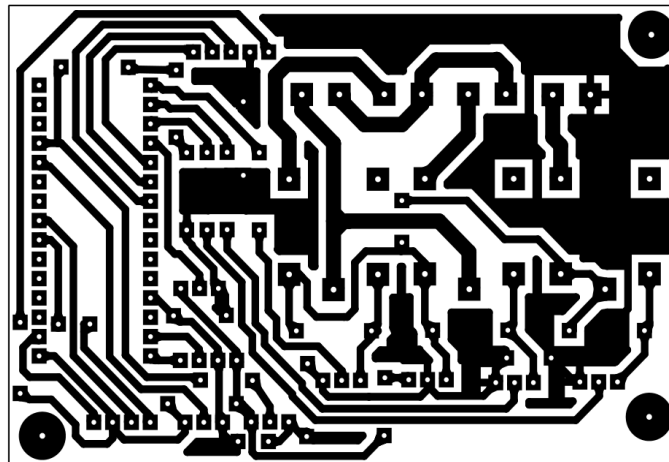


Figura 25. Cara inferior del diseño electrónico – Proteus.

Fuente: Creación Propia.

Después de haber definido el tamaño del invernadero se procedió con la construcción del primer prototipo, en el cual se instalaron los sensores para corroborar el correcto funcionamiento de estos, comparando las mediciones que arrojaban dentro del invernadero con mediciones que se había realizado anteriormente con los sensores fuera del mismo.

El prototipo final es consecuencia de la continua recopilación de información, obtenida a través de las diferentes pruebas realizadas en modelos anteriores. Todos los prototipos fueron diseñados y contruidos con la intención de generar el menor costo posible, garantizando de esta manera, la accesibilidad a un mayor porcentaje de usuarios potenciales. El prototipo presentado en este documento corresponde a la tercera generación, que cuenta con diferentes cambios a partir desde el primer prototipo. Problemas frecuentes encontrados en modelos previos fueron clave para obtener el resultado final. A continuación, se especifican las características de cada uno de ellos.

El modelo cuenta con un sistema de apertura superior que permite el fácil acceso del usuario al cultivo. Posee un sistema de circulación de aire, luces con rotación de 180° y una caja de eléctrica protectora para las partes electrónicas. La figura 26 presenta las imágenes del prototipo final.



Figura 26. Imágenes representativas del prototipo final.

Fuente: Propia.

3.3.3.4 Materiales de construcción del prototipo.

El prototipo final del invernadero fue construido con los materiales listados en la tabla 6.

Tabla 7

Lista de materiales utilizados en la construcción del prototipo final.

Partes	Materiales	Cantidad		Precio unitario	Subtotal
Estructurales	Bastones de madera	2	Und	\$ 11.000,00	\$ 22.000,00
	Plástico de recubrimiento	10	m ²	\$ 1.300,00	\$ 13.000,00
	Bisagras	4	Und	\$ 1.000,00	\$ 4.000,00
	Tornillo Drywall	20	Und	\$ 20,00	\$ 400,00
	Arandelas	8	Und	\$ 20,00	\$ 160,00
	Clavos para madera	15	Und	\$ 25,00	\$ 375,00
	Pintura	1	Galón	\$ 16.000,00	\$ 16.000,00
Eléctricos	Caja de paso - Schneider	1	Und	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00
	Bomba de pecera	1	Und	\$ 21.000,00	\$ 21.000,00
	Manguera flexible 8mm	6	m	\$ 2.300,00	\$ 13.800,00
	Luces LED 110V	2	Und	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
	Termoencogible	3	m	\$ 1.000,00	\$ 3.000,00
	Conductor UTP	6	m	\$ 3.900,00	\$ 23.400,00
	Conductor Vehicular	5	m	\$ 1.800,00	\$ 9.000,00
Electrónicos	ARDUINO Nano	1	Und	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
	Relays	4	Und	\$ 2.900,00	\$ 11.600,00
	DS1307	1	Und	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
	Borneras militares	8	Und	\$ 7.200,00	\$ 57.600,00
	Resistor 1kΩ	4	Und	\$ 100,00	\$ 400,00
	Pines hembra	4	Und	\$ 4.000,00	\$ 16.000,00
	2N2222	3	Und	\$ 4.200,00	\$ 12.600,00
	Fuente 12V - 5V - 3.3V	1	Und	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
	Baquela 10x10	1	Und	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
	Integrado ULN2003A	1	Und	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
	Buzzer Pequeño	1	Und	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00
	Fan cooler	2	Und	\$ 10.000,00	\$ 20.000,00
Cultivo	Potera	1	Und	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
	Planta	1	Und	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00
Total					\$ 365.335,00

Fuente: Creación Propia.

3.3.3.5 Características constructivas del prototipo final.

El material utilizado para realizar la estructura fue madera debido a su bajo costo, maleabilidad y accesibilidad. Se optó por realizar un cubo ya que es simétrico y puede ser ubicado en cualquier esquina dentro del hogar o en una repisa. Además, desde el punto de vista estructural, es una figura que ofrece estabilidad, ya que al ser planas todas sus caras y tener vértices de 90° ofrece una distribución uniforme de la presión y fuerzas externas aplicadas a la superficie del invernadero. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, hay que añadir que el centro de gravedad del invernadero es bajo, ya que el peso se concentra en el fondo de la estructura porque la maceta va colocada en el centro y hace contacto con el fondo del invernadero, por lo tanto, podemos afirmar que es bastante difícil que el invernadero se vuelque por algún tropiezo o viento.

3.3.3.6 Recubrimiento del invernadero.

Para el recubrimiento se utilizó plástico protector Homecenter, el cual ofrece maleabilidad, permeabilidad lumínica y bajo precio. La elección del material fue fundamentada con las pruebas realizadas en los prototipos 1 y 2, siendo el prototipo 1 cubierto con vidrio y el 2 con acetato; el vidrio era un material muy delicado y pesado por lo que su usabilidad era poco ortodoxa, por otro lado el acetato, cambiaba su longitud a temperaturas entre 30°- 40; se consideró utilizar acrílico, pero debido a su costo la idea fue descartada ya que hace parte del objetivo de este proyecto realizar un prototipo económico.

3.3.3.7 Programación ARDUINO.

La tarjeta electrónica ARDUINO utiliza códigos de programación para realizar las actividades propuestas por el usuario. Para el control de los sensores se emplearon códigos y librerías disponibles en la Web. Además, se aprovecharon las subrutinas para individualizar cada

subsistema y de esta manera tener un control más preciso de los horarios de iluminación y riego necesarios por la planta, ver anexo 1. Código de programación ARDUINO.

En la mayoría de los casos, los sensores envían sus mediciones a la tarjeta ARDUINO y esta, al PC por medio de un cable fuente distintivo. La visualización de los datos puede ser editada directamente en el código y posteriormente proyectada en una ventana separada del software ARDUINO. La problemática reside en que, para poder tener una visualización en tiempo real de toda la información, un PC debe estar conectado siempre a la tarjeta electrónica; lo anterior resulta impráctico por el consumo adicional que genera el computador.

Por lo tanto, se optó por desarrollar una aplicación cuyo principio de conexión es el protocolo Bluetooth. La aplicación fue diseñada y compilada en la página web gratuita APP INVENTOR para el sistema operativo Android. La función principal del aplicativo es la visualización en tiempo real de todos los datos que arrojan los sensores del invernadero. La figura 27 muestra la interfaz de la aplicación desarrollada.



Figura 27. Interfaz de la aplicación Android para monitorear el invernadero.

Fuente: Creación Propia.

3.3.3.8 Horarios de funcionamiento preestablecidos.

El sistema de control del invernadero propende por preservar la integridad del cultivo, así como también, promueve la eficiencia energética del prototipo final. Con el fin de proporcionar un control eficiente del crecimiento de la planta y ahorro energético, el sistema de control activa los subsistemas en un rango de 7am-7pm, es decir, si en ese rango de tiempo se detecta alguna necesidad por parte del cultivo, el subsistema correspondiente actuará, fuera de este rango no ejecutará acción alguna.

Esta medida no afecta ninguna de las variables que intervienen en el crecimiento de la planta, ya que los cultivos aproximadamente solo necesitan 8 horas de luz para que su desarrollo sea el óptimo, y proporcionar luz artificial mayor a lo necesitado podría ocasionar daños irreparables al cultivo (FCA, 2012). En el caso de los subsistemas de riego y ventilación, evitará el desgaste de actuadores mecánicos tales como, relés, motobomba, entre otros.

3.4. Etapa III: Mediciones y pruebas

Para cada uno de los sistemas se realizaron mediciones por separado y en conjunto con el prototipo. A continuación, se describen las pruebas y mediciones obtenidas para cada sistema.

3.4.1. Medición de humedad relativa del suelo.

Para la obtención de las respectivas mediciones, primero se delimitó un área de tierra de 0,4 m² en donde se colocó de forma superficial una manguera con puntos de difusión, para que el agua pudiera salir e irrigar el suelo; para cada prueba se emplearon 500 ml de agua. La manguera estaba conectada a una botella plástica que era elevada manualmente para que, por acción de la gravedad el agua bajase. Se buscaba observar el comportamiento del agua al salir de la manguera pudiendo así seleccionar el mejor lugar para instalar el higrómetro. Se realizaron mediciones de la humedad del suelo (HR) antes de irrigarlo y después de irrigarlo en tres puntos adyacentes con distancias equitativas entre sí (parte superior P1, centro P2 e inferior del invernadero P3). Durante 3 días consecutivos, se midió la humedad del suelo antes y después de irrigarlo tomando 5 muestras de cada posición del higrómetro con un intervalo de 2 min. Las figuras 28 y 29 corresponden al día 1.

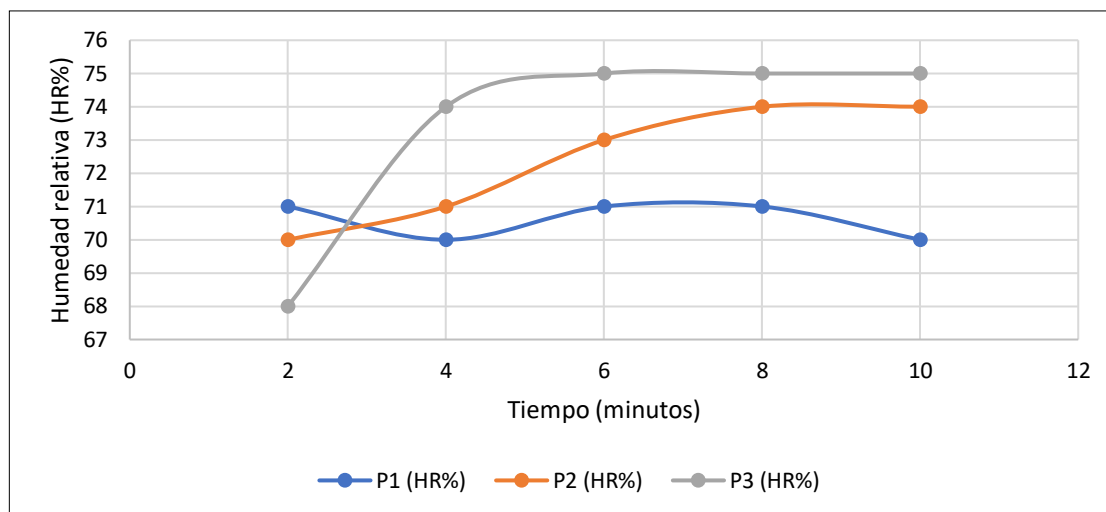


Figura 28. Día 1 - Humedad del suelo sin irrigar.

Fuente: Creación Propia.

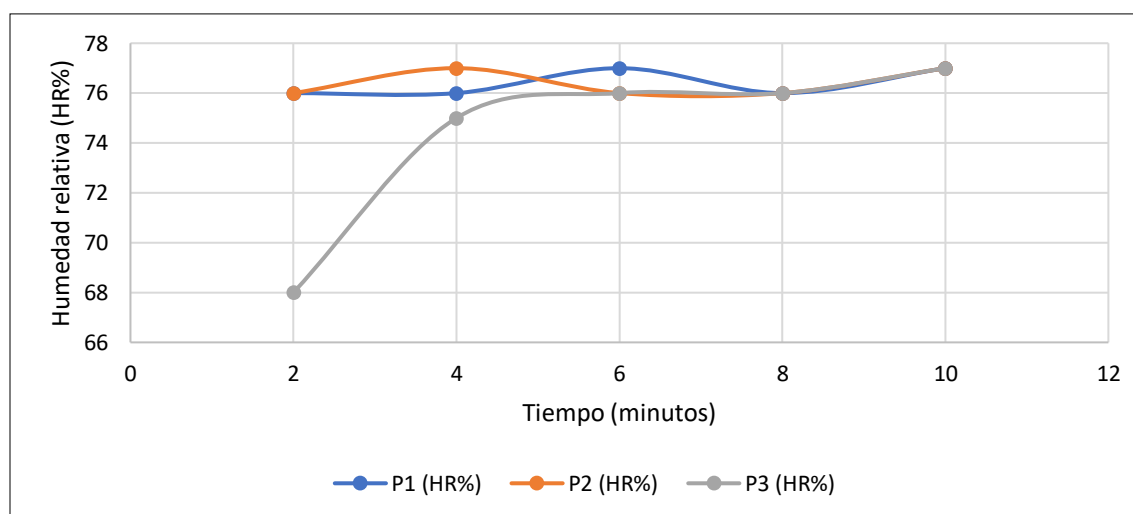


Figura 29. Día 1 - Humedad del suelo irrigado.

Fuente: Creación Propia.

Para las mediciones de humedad del día 2 se utilizó un tiempo de riego de 10 minutos con flujo de agua estable. La figura 30 y 31 presentan las mediciones del higrómetro en los diferentes puntos antes y después de irrigar el terreno nuevamente.

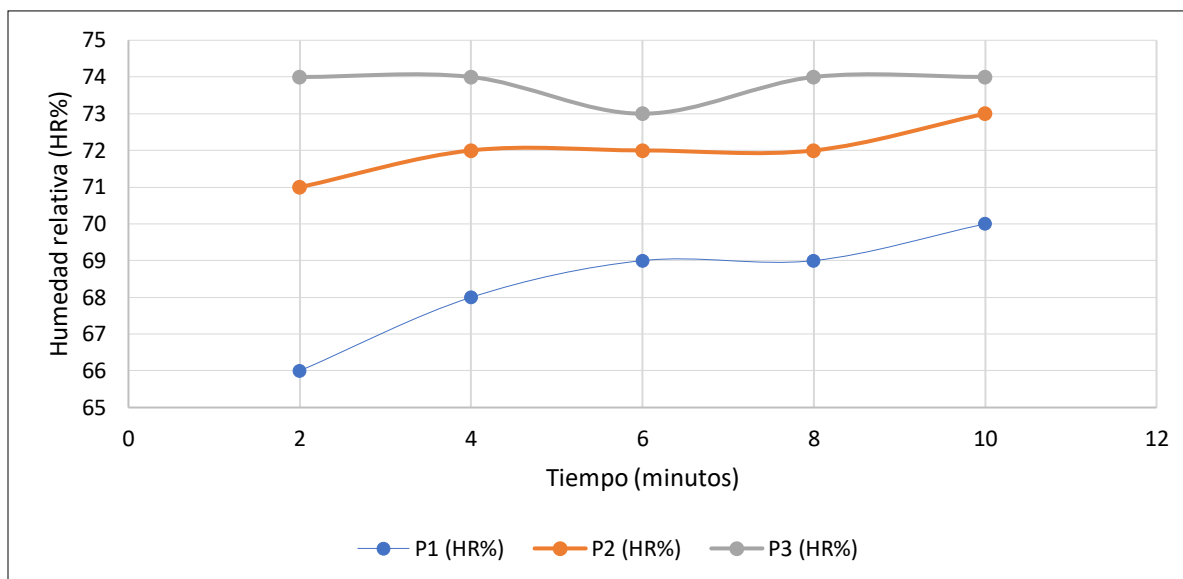


Figura 30. Día 2 - Humedad del suelo sin irrigar.

Fuente: Creación Propia.

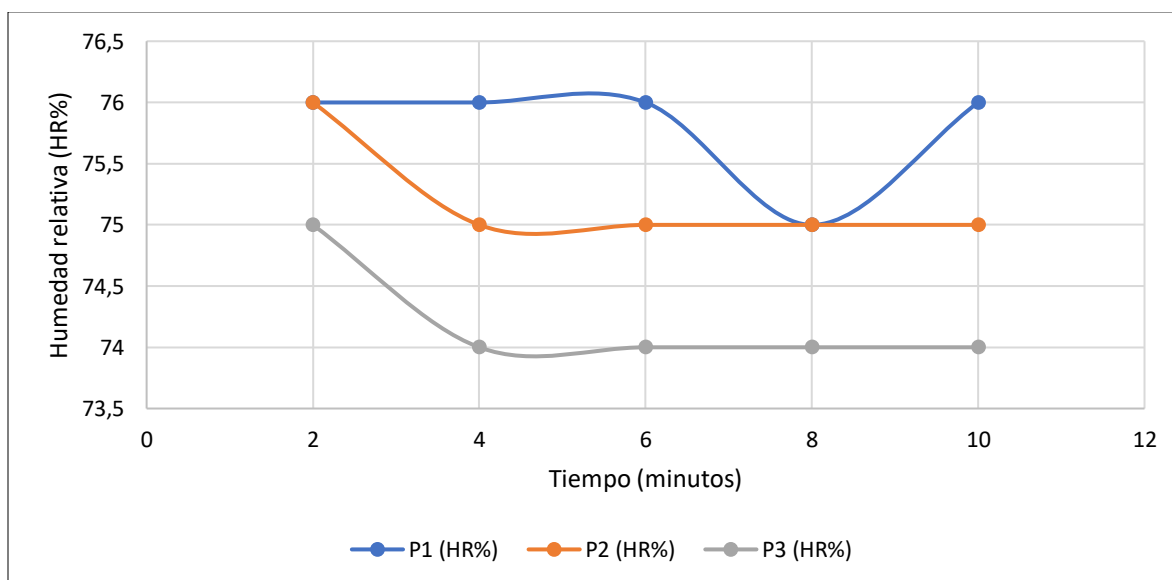


Figura 31. Día 2 - Humedad del suelo irrigado.

Fuente: Creación Propia.

Finalmente, las figuras 32 y 33 muestran las mediciones de humedad del suelo antes y después de haber sido irrigado por un periodo de tiempo de 10 minutos.

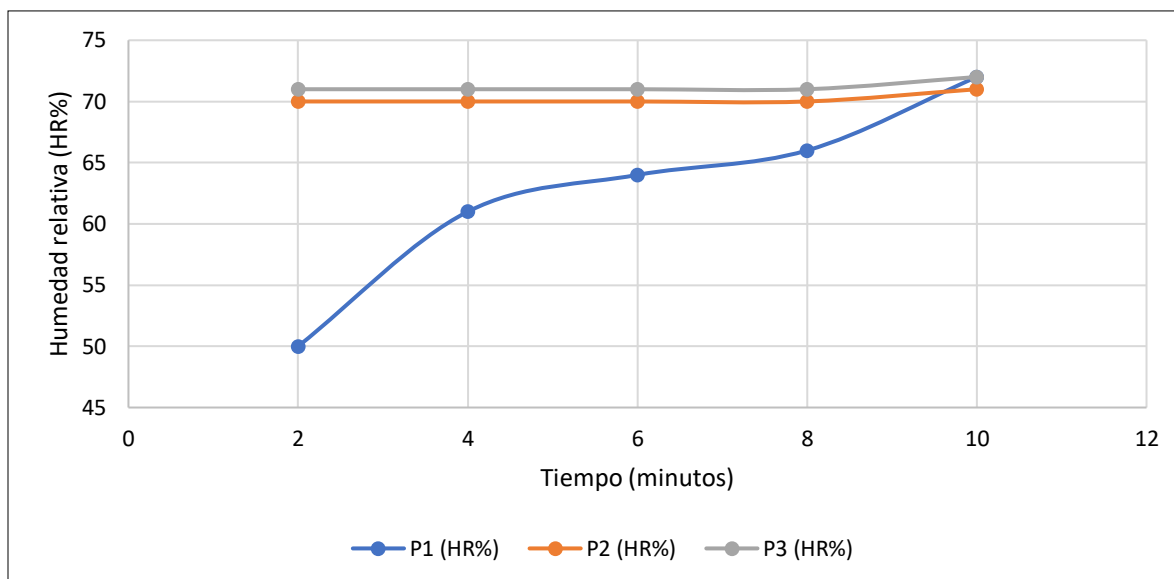


Figura 32. Día 3 - Humedad del suelo sin irrigar.

Fuente: Creación Propia.

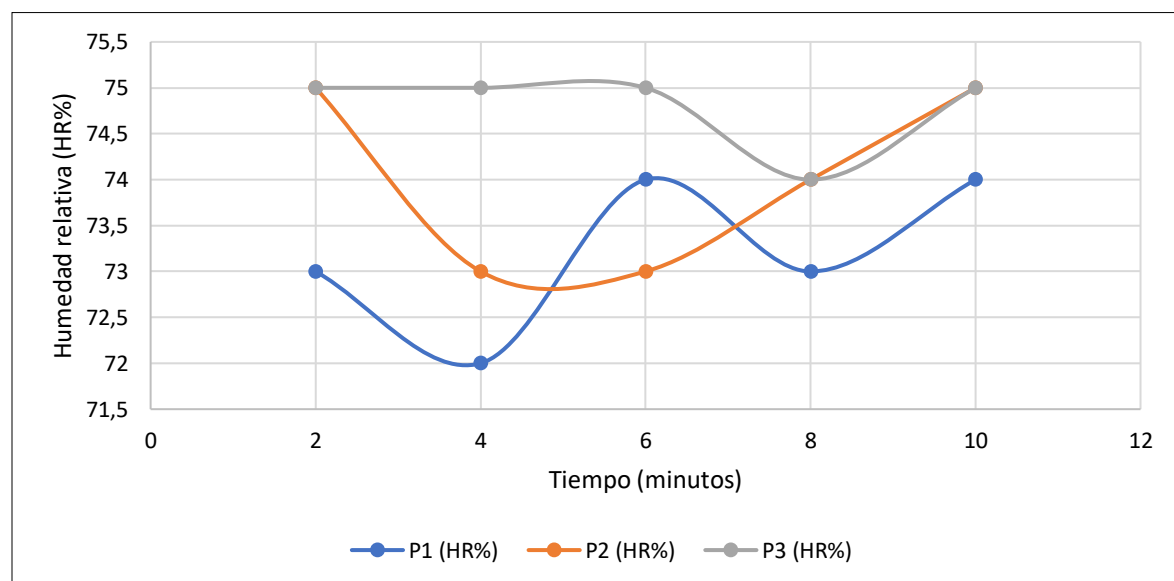


Figura 33. Día 3 - Humedad del suelo irrigado.

Fuente: Creación Propia.

Si se comparan las mediciones realizadas antes de irrigar y después de irrigar el terreno, se podría observar una variación del HR casi constante en cada uno de los 3 puntos de medición (P1, P2 y P3) dentro de los 3 días en que se realizaron las pruebas. Con la experimentación se logró determinar que, debido a la capilaridad del terreno, el agua se extiende de forma equitativa

a lo largo y ancho del suelo. Se determinó que el mejor lugar para instalar el higrómetro es a un medio ($1/2$) de la distancia que hay entre la manguera y la pared o borde que se encuentra paralelo a ella siendo este la arista del macetero.

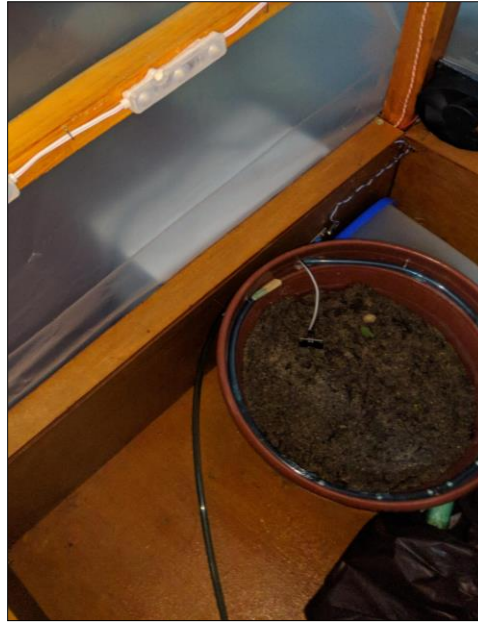


Figura 34. Posición del higrómetro en suelo.

Fuente: Creación Propia.

3.4.2. Medición de temperatura.

Para realizar las mediciones de temperatura, se instaló el sensor (DHT11) en un prototipo de invernadero para simular el ambiente en el cual el sensor va a estar expuesto normalmente buscando que las condiciones sean las más cercanas a las del diseño final. El invernadero prototipo se colocó a la sombra del hogar con el fin de observar el comportamiento de la carga térmica al interior del invernadero y poder determinar requerimientos de ventilación forzada. Durante dos días consecutivos se midió la temperatura al interior del invernadero a la sombra. La figura 35 y figura 36 indican el comportamiento de las temperaturas medidas por el sensor en el día 1 y 2 respectivamente.

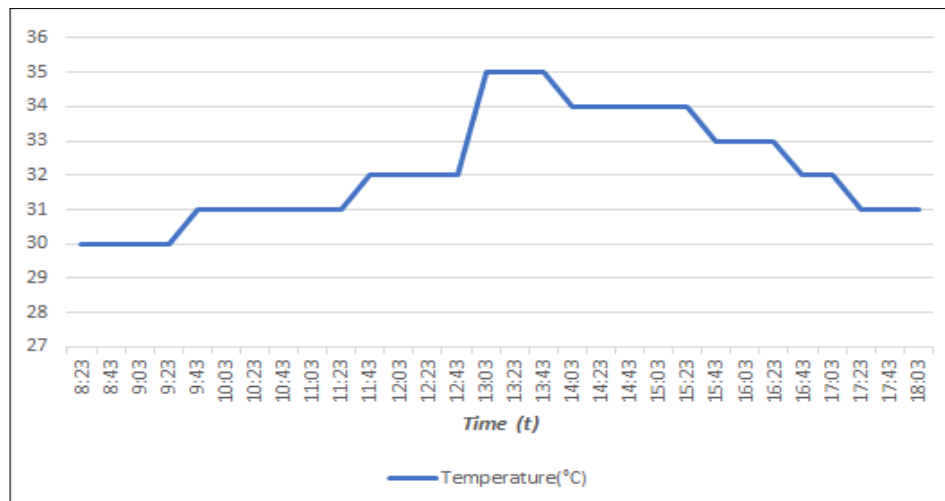


Figura 35. Comportamiento de la temperatura día 1.

Fuente: Creación Propia.

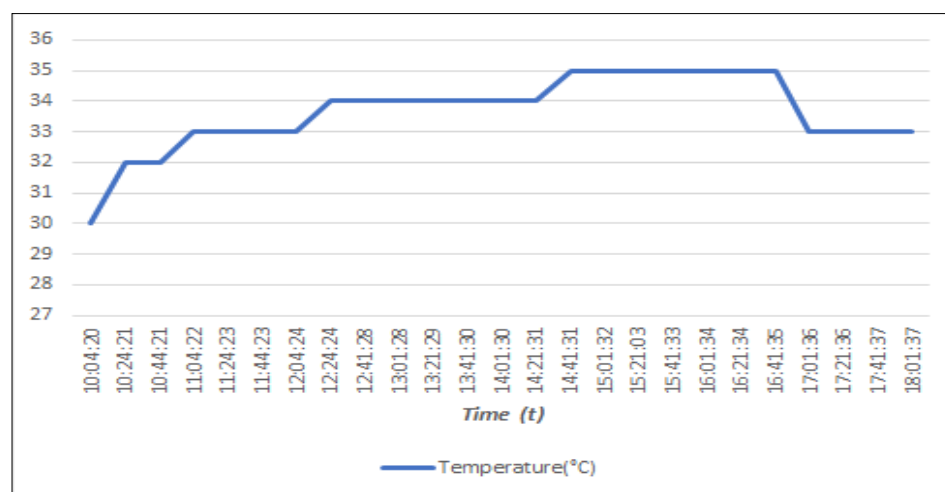


Figura 36. Comportamiento de la temperatura día 2.

Fuente: Creación Propia.

Las mediciones indicaron que era necesario hacer uso de ventiladores para generar recirculación de aire, con esto se buscaba evitar la sofocación de la planta; con la ventilación forzada también se busca renovar el aire ya que las plantas emanan CO_2 y es necesario que tengan aire fresco para su respiración.

3.4.3. Medición de porcentaje de iluminación.

Para la toma de mediciones, la LDR (elemento medidor) se ubicó fuera del prototipo final, con el propósito de monitorear el comportamiento de la luz natural durante el transcurso del día. En este orden de ideas, se llevaron a cabo dos pruebas experimentales, la primera consistió en tomar mediciones cuando el prototipo se encontraba resguardado bajo techo, cerca de una ventana que dejaba pasar luz natural y en la segunda se realizaron mediciones similares exponiendo el prototipo directamente a la luz solar. Con estos experimentos se buscaba saber qué cantidad mínima y máxima de luz natural era capaz de llegar hasta el invernadero cuando se bajó estas dos condiciones.

Con los resultados obtenidos se establecieron límites mínimos y máximos de porcentaje de iluminación para programar el encendido y apagado de las luces artificiales. En la figura 37 y 38 se puede observar los diferentes niveles de iluminancia que fueron medidos por el sensor, teniendo en cuenta las condiciones mencionadas en párrafos anteriores.



Figura 37. Porcentaje de iluminación en ambiente indoor – Día 1.

Fuente: Creación Propia.

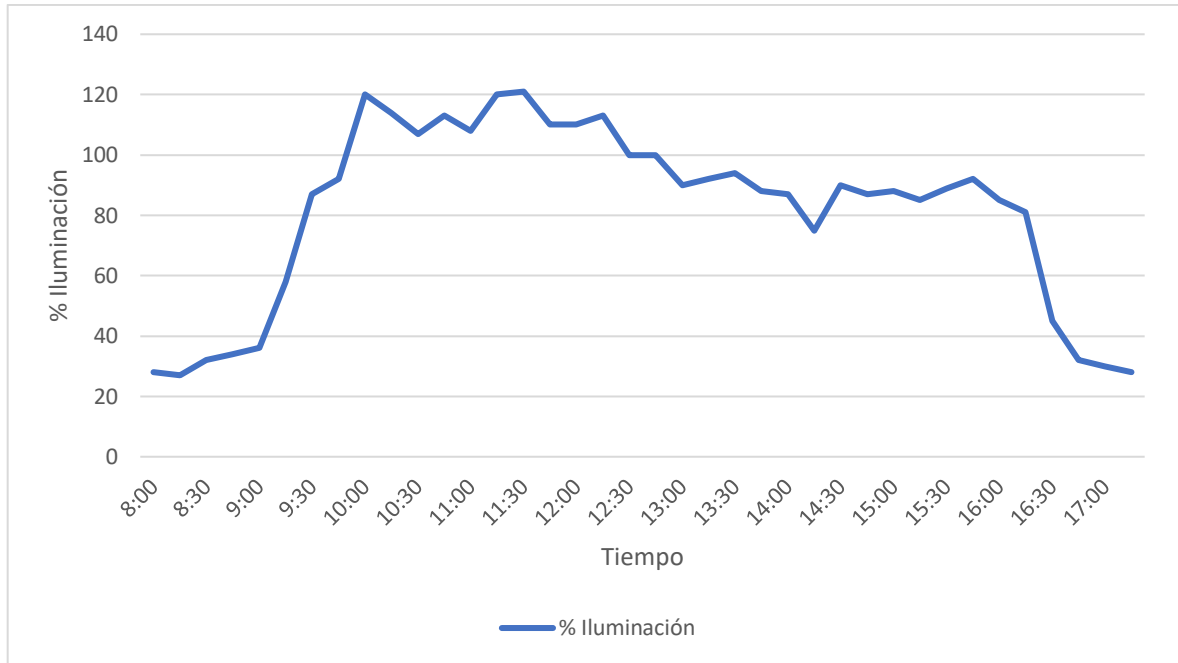


Figura 38. Porcentaje de iluminación en ambiente outdoor - Día 2.

Fuente: Creación Propia.

Finalmente, se determinaron los valores límite para la programación de las luces artificiales; se estableció un valor mínimo de 15 % ya que fue el promedio de las medidas tomadas bajo techo, es decir, que este es valor decide el accionamiento de las luces instaladas. Por otro lado, se determinó que el valor promedio máximo que puede ofrecer el contacto directo es de 82%. por lo que se fijó un rango de iluminancia óptimo para la planta, criterio por el cual fueron escogidas las luces artificiales. En otras palabras, que los luxes aportados por las luces artificiales no sobrepasaran de manera exagerada los valores obtenido a plena luz del día.

4. Conclusiones

El presente proyecto de grado promueve significativamente la sostenibilidad por medio del cultivo de plantas para el consumo humano, con un bajo presupuesto y un nivel de atención mínimo. Desde un punto de vista social, resulta ser una gran alternativa de sustento diario para comunidades vulnerables que se encuentren en ambientes con escasa cantidad de comida en Colombia. El prototipo fue construido con materiales económicos que cumplen las funciones necesarias para mantener los cultivos con un desarrollo óptimo, el uso de estos materiales permitió desarrollar un invernadero que cuesta 40% menos que sus homólogos en el mercado.

A diferencia de otros proyectos relacionados, este proyecto no solo se encarga de monitorear las condiciones de la planta, sino que también se encarga de suministrarle las condiciones adecuadas, no solo se enfoca en la temperatura o en la humedad o en la luz que recibe la planta, sino que se enfoca en las tres variables. Teniendo en cuenta las aplicaciones de este proyecto a nivel “individuo” y a nivel “industrial” se puede afirmar que el prototipo puede ser una ayuda para reducir la importación de frutas y verduras ya que la demanda dejaría de superar la oferta de dichas frutas y verduras o al menos reduce el margen entre la demanda y la oferta.

Una limitante que se encontró para el desarrollo de este proyecto es el tiempo que toma ensamblar toda la estructura y la circuitería ya que no contamos con las facilidades de una planta ensambladora.

Como acciones de mejora a futuro se sugiere desarrollar:

- **Sistema de alertas completo.** El prototipo final posee un subsistema de alerta sencillo para prevenir que la bomba funcione sin agua. Una mejora futura necesaria es la adición de este subsistema de alerta para prevenir, la exposición excesiva de luz y un aumento de temperatura no manejable, en este orden de ideas, se incluirían los subsistemas de iluminación y temperatura.
- **Protocolo de comunicación Wi-Fi.** El prototipo final utiliza un protocolo de comunicación Bluetooth para enviar la información a la aplicación Android desarrollada, sin embargo, solo funciona cuando hay cercanía entre los dos dispositivos. Una mejora futura sería la implementación de un módulo Wi-Fi y servidor para que la información que entrega el prototipo final pueda ser almacenada en la nube y se pueda acceder a ella desde cualquier dispositivo con internet.
- **Sistema Fotovoltaico.** El prototipo final necesita estar conectado a un fluido eléctrico domiciliario para su funcionamiento, es decir, no puede ubicarse en lugares aislados desprovisto de este suministro. Una mejora futura sería la implementación de un sistema fotovoltaico para que el invernadero pueda utilizar la energía generada por este. De esta manera, podría utilizarse en hogares aislados donde el suministro de energía eléctrica no es constante.
- **Mejoras estéticas.** El prototipo final fue construido en madera resistente por su calidad-precio, sin embargo, no es un material duradero y tiende a ser presa fácil de muchos insectos y roedores. Por otro lado, la placa Arduino utilizada tiene limitaciones de tipo electrónico que se pueden solucionar con hardware más sofisticado. Una mejora futura sería el uso de un material más resistente para la

construcción de la estructura, que sea ligero y pueda soportar el peso de los cultivos y de más elementos del sistema de control.

Referencias

- Amésquita, E., Barrera, L., Burbano, H., Clavijo, J., Espinosa, J. A., García, A., ... Zapata, R. (2001). Fertilidad de Suelos. Diagnóstico y Control. *Sociedad Colombiana de La Ciencia Del Suelos*, 507.
- Bär Nora. (2007). Crean plantas que crecen en medios hostiles - LA NACION. Retrieved August 29, 2018, from LA NACIÓN website: <https://www.lanacion.com.ar/929317-crean-plantas-que-crecen-en-medios-hostiles>
- Barraza, F. V., Fischer, G., & Cardona, C. E. (2004). Studying the process of tomato crop (*Lycopersicon esculentum* Mill.) growth in the Middle Sinu Valley, Colombia. *Agronomía Colombiana*, 22(1), 81–90.
- Bigtronica. (2017). Circuito Integrado ULN2003 - BIGTRONICA SEDE CENTRO. Retrieved January 12, 2020, from <https://www.bigtronica.com/centro/semiconductores/circuitos-integrados/1692-circuito-integrado-uln2003-5053212016920.html>
- BioEnciclopedia. (2010). La Célula Vegetal - Información y Características.
- Buemi, F., Massa, M., Sandini, G., & Costi, G. (1996). The AGROBOT project. *Advances in Space Research*, 18(1–2), 185–189. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00807-Q](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00807-Q)
- Canna Research. (2003). Influencia de la temperatura ambiental en las plantas. Retrieved January 11, 2020, from http://www.canna.es/influencia_temperatura_ambiental_en_las_plantas
- Carlos, J., Hernández, L., & Pérez-parra, J. (1999). *Evolución de las estructuras de los invernaderos*.
- Claudia Sarmiento. (2014, August 4). *El 65% de los alimentos de la región Caribe son importados del interior país: Esap | El Herald*. p. 1. Retrieved from <https://www.elheraldo.co/economia/el-65-de-los-alimentos-de-la-region-caribe-son-importados-del-interior-pais-161672>
- Contreras, R. L. G., Duarte, R. M. Í., & Contreras, F. R. (2011). Comportamiento de híbridos de tomate bola en invernadero bajo condiciones desérticas del Noroeste de Sonora. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*.
- DANE. (2005). Estudios demográficos del DANE revelan que la población colombiana entre el 2005 y 2010 crecerá a una tasa media anual de 1 . 18 %, lo que significa que al terminar el quinquenio Colombia. *Dane*, 6. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/files/BoletinProyecciones.pdf>
- DANE. (2019). Empleo y desempleo. Retrieved December 29, 2019, from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/mercado-laboral/empleo-y-desempleo>
- DFRobot. (2016). *Moisture Sensor (SKU:SEN0114)*. Retrieved from [http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Moisture_Sensor_\(SKU:SEN0114\)](http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=Moisture_Sensor_(SKU:SEN0114))
- Digfineart. (2018). Variables que afectan el crecimiento de las plantas / Digfineart.com.

- E-Shop. (2019). Arduino Board - Arduino Nano - China Clone - RAM Electronics. Retrieved December 29, 2019, from <https://ram-e-shop.com/product/kit-arduino-nano/>
- FAO. (1999). *Optimizacion de la humedad del suelo para la produccion vegetal*. 111.
- FCA. (2012). Control de la floración. In *FCA* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ferretrónica. (2019). Modulo DS3231 / AT24C32 Reloj. Retrieved January 20, 2020, from https://ferretronica.com/products/modulo-ds3231-at24c32-reloj-tiempo-real-con-bateria?variant=19687681949789¤cy=COP&utm_campaign=gs-2020-01-11&utm_source=google&utm_medium=smart_campaign&gclid=Cj0KCQiAmZDxBRDIARIABnkbYSbV0u6RFj7of9hrEm2YWfexx9LJoKd
- Fischer, G. (2014). Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta. *Revsita Comalfi*, XXVI(January 1999), 95–105. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/257069715_Efecto_de_la_temperatura_del_suelo_sobre_la_planta_1_Crecimiento_y_desarrollo
- Fundación Cotec. (2009). Los invernaderos: estado de la tecnología. Retrieved August 29, 2018, from 2009 website: <https://www.interempresas.net/Agricola/Articulos/32920-Los-invernaderos-estado-de-la-tecnologia.html>
- García, B., Tutores, A., León, C., & Al-Hadithi Abdul Qadir, R. M. (2014). *Control y Monitorización de un Invernadero a través de una Aplicación Móvil*. Retrieved from <http://icra.blogspot.es/>
- García, M. A., Gutiérrez, S. ;, López, H. C. ;, Rivera, S. Y., & Ruiz, A. C. (2007). Estado del arte de la tecnología de robots aplicada a invernaderos State of the art of robot technology applied to greenhouses. *Rev. AIA*, 11(3), 41–52. Retrieved from [http://www.ucol.mx/revaiia/anteriores/PDF DE REVISTA/2007/act pdf/estado.pdf](http://www.ucol.mx/revaiia/anteriores/PDF%20DE%20REVISTA/2007/act%20pdf/estado.pdf)
- Grupo MSC. (2017). La Importancia de Cultivar en Invernadero. Retrieved August 29, 2018, from MSC invernaderos website: <https://grupomsc.com/blog/invernadero/la-importancia-cultivar-invernadero>
- Hernández, A. (2015). Indicador Electrónico de Nivel de Agua. Retrieved January 15, 2020, from <https://tallerelectronica.com/2015/03/10/indicador-electronico-de-nivel-de-agua/>
- IFA. (1992). *World Fertilizer use Manual*. Retrieved from <https://www.fertilizer.org/>
- Juan León Vázquez. (2013). Parámetros de diseño de la chimenea solar. *Universidad Politécnica de Cataluña*, 63. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/41816498.pdf>
- Kolokotsa, D., Saridakis, G., Dalamagkidis, K., Dolianitis, S., & Kaliakatsos, I. (2010). Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses. *Energy Conversion and Management*, 51(1), 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.09.007>
- López, J. R. (2017). La importancia de la luz en las plantas. Retrieved January 11, 2020, from Garden Catalunya Plants website: <https://www.catalunyaplants.com/la-importancia-de-la-luz-en-las-plantas/>

- Lugo Espinosa, O., Villavicencio Pérez, G. A., & Díaz Luna, S. A. (2014). Paquete tecnológico para el monitoreo ambiental en invernaderos con el uso de hardware y software libre. *Terra Latinoamericana*, 32(1), 77–84. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792014000100077&lang=pt#B1
- Luis Thayer Ojeda. (2010). ¿Qué es Arduino? ~ Arduino.cl. Retrieved March 17, 2018, from <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- MercadoLibre. (2018a). Bomba De Agua Para Fuentes - Acuarios - Pesebres 220 L/h. Retrieved January 14, 2020, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-538790974-bomba-de-agua-para-fuentes-acuarios-pesebres-220-lh-_JM?variation=45115028159&quantity=1#reco_item_pos=1&reco_backend=machinalis-seller-items&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-seller-items-above
- MercadoLibre. (2018b). Tubo De Vinilo Transparente Manguera De Pvc 60 Psi Hibrido L. Retrieved January 14, 2020, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-517130953-tubo-de-vinilo-transparente-manguera-de-pvc-60-psi-hibrido-l-_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking_id=4bf2eaab-03f9-443f-ae5-415dd6c6eb0a
- Mouser Electronics. (2011). DHT11 - Humidity and Temperature Sensor. *Datasheet*, 1–7. Retrieved from <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf%0Ahttp://www.micropik.com/PDF/dht11.pdf%0Ahttp://robocraft.ru/files/data-sheet/DHT11.pdf>
- OMS. (2013). OMS | Fomento del consumo mundial de frutas y verduras. *WHO*, 2.
- Paz, M. L. (2015). *Manual de capacitación: riego por goteo* (1a ed. edi; M. Liotta, Ed.). Retrieved from https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_manual_riego_por_goteo.pdf
- Perea Palacios, J. (2016). Diseño De Un Sistema De Monitoreo, Registro Y Control De Temperatura Y Humedad Para Un Cultivo De Invernadero. *Universidad Tecnológica De Pereira*, 79. <https://doi.org/10.1056/NEJM199405193302003>
- Reyna Huamán, C. E. (2015). Sistema automatizado para el monitoreo y control de humedad en un invernadero. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*. Retrieved from <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6214>
- Royal Queen Seed. (2010). ¿Por Qué Son Los Invernaderos Tan Populares Para El Cultivo De Cannabis? - RQS Blog. Retrieved August 29, 2018, from 2010 website: <https://www.royalqueenseeds.es/blog-por-que-son-los-invernaderos-tan-populares-para-el-cultivo-de-cannabis-n318>
- Sammons, P. J., Furukawua, T., & Bulgin, A. (2005). Autonomous pesticide spraying robot for use in a greenhouse. In *Australian Conference on Robotics and Automation*. <https://doi.org/ISBN-0-9587583-7-9>
- Schroeder, T. C., Tonsort, G. T., Pennings, J. M. E., & Minter, J. (2007). Consumer food safety risk perceptions and attitudes: Impacts on beef consumption across countries. *B.E. Journal*

- of Economic Analysis and Policy*, 7(1), 1–27. <https://doi.org/10.2202/1935-1682.1848>
- Setbon, M., Raude, J., Fischler, C., & Flahault, A. (2005). Risk perception of the “mad cow disease” in France: Determinants and consequences. *Risk Analysis*, 25(4), 813–826. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00634.x>
- SICNA. (2013). Sistema de Consulta de Indicadores del Tercer Censo Nacional Agropecuario. Retrieved August 29, 2018, from <http://formularios.dane.gov.co/sicna/start#>
- Stanhill, G., & Enoch, H. Z. (1999). *Greenhouse ecosystems*. Retrieved from <http://www.worldcat.org/title/greenhouse-ecosystems/oclc/680467701>
- Teslyuk, T., Denysyuk, P., Kernyskyy, A., & Teslyuk, V. (2015). Automated control system for arduino and android based intelligent greenhouse. *2015 XI International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*, (1), 7–10. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/ielx7/7297752/7299433/07299440.pdf?tp=&arnumber=7299440&isnumber=7299433%5Cnhttp://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=7299440
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2007). Greenhouse | Britannica.com. *Encyclopaedia Britannica*, 1(1), 1. Retrieved from <https://www.britannica.com/topic/greenhouse>
- Universidad del Norte. (2010). Sobre Barranquilla. Retrieved August 29, 2018, from <http://eventos.uninorte.edu.co/index.php/biredial/index/pages/view/barranquilla>
- Universidad Politécnica De Madrid. (2003). *Instalaciones de ventilación. 1*, 42. Retrieved from <http://www.aq.upm.es/Departamentos/Fisica/UD-instalaciones/Doc02.pdf>
- Voltage, C. R. (2009). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*. Retrieved from www.rohm.com
- von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., von Zabeltitz, C., Gratraud, J., ... Suay-Cortes, R. (2000). Review of Structural and Functional Characteristics of Greenhouses in European Union Countries: Part I, Design Requirements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75(1), 1–16. <https://doi.org/10.1006/JAER.1999.0502>
- Weatherell, C., Tregear, A., & Allinson, J. (2003). In search of the concerned consumer: UK public perceptions of food, farming and buying local. *Journal of Rural Studies*, 19(2), 233–244. [https://doi.org/10.1016/S0743-0167\(02\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0743-0167(02)00083-9)

Anexos

Anexo 1. Código de programación ARDUINO

```
#include "RTCLib.h"// Libreria - reloj

#include <DHT.h> // Libreria - Temperatura
#include <Wire.h> // Libreria - Sensor de Luz

// Reloj

RTC_DS1307 RTC;

// Temperatura
int SensorHum = 9;
int fan = 10;
int temp, humedad;
DHT dht (SensorHum, DHT11);

//Higrometro
int higrometro = A1;
int bomba = 11;

// Sensor de luz (LDR)
long A = 1000; //Resistencia en oscuridad en KΩ
int B = 15; //Resistencia a la luz (10 Lux) en KΩ
int Rc = 10; //Resistencia calibracion en KΩ
int LDRPin = A0; //Pin del LDR
int LuzPin = 12;
int V;
int ilum;

void setup(){

  Serial.begin(1000);

  // Activa reloj
  Wire.begin(); // Inicia el puerto I2C
  RTC.begin(); // Inicia la comunicación con el RTC
  //RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__)); // Establece la fecha y hora (Comentar una
  // vez establecida la hora)
  Serial.begin(9600); // Establece la velocidad de datos del puerto serie

  // Activa temperatura
  dht.begin();
```

```

//Activa Higrometro
pinMode(higrometro, INPUT);
pinMode(bomba, OUTPUT);
}

void temperatura (){

    // Temperatura
    humedad = dht.readHumidity();
    temp = dht.readTemperature();
    Serial.print(temp);
    Serial.print(",");
    Serial.print(humedad);
    Serial.print(",");

    if(temp>35)
    {
        digitalWrite(fan, HIGH);
        Serial.print("Fan = ON");
        Serial.print(",");
    }
    else
    {
        digitalWrite(fan, LOW);
        Serial.print("Fan = OFF");
        Serial.print(",");
    }

}

void sn () {

    //Sensor de nivel
    int nivel = analogRead(sn);
    If(nivel==HIGH)
    {
        digitalWrite(bomba, LOW);
    }
    else
    {

void higo () {

    //Higrometro
    int humedad = analogRead(higrometro);

```

```

int hr = map(humedad, 0, 1023, 100, 0);
Serial.print(hr);
Serial.print(",");
if(hr<60)
{
    digitalWrite(bomba, HIGH);
    Serial.print("Bomba = ON");
    Serial.print(",");
}
else
{
    digitalWrite(bomba, LOW);
    Serial.print("Bomba = OFF");
    Serial.print(",");
}
}
}

void luz (){

    V = analogRead(LDRPin);

    //ilum = ((long)(1024-V)*A*10)/((long)B*Rc*V); //usar si LDR entre GND y A0
    ilum = ((long)V*A*10)/((long)B*Rc*(1024-V)); //usar si LDR entre A0 y Vcc (como en
    el esquema anterior)

    Serial.print(ilum);
    Serial.print(",");

    if (ilum < 15) {
        digitalWrite(LuzPin, HIGH);
        Serial.println("Luces = ON");

    }
    else {
        digitalWrite(LuzPin, LOW);
        Serial.println("Luces = OFF");
    }
    delay(3000);
}

void loop(){

    // RELOJ - Obtención de datos

    DateTime now = RTC.now();

```

```

Serial.print("Dia de la semana: ");
Serial.println(now.dayOfWeek(), DEC); // L(1), M(2), X(3), J(4), V(5), S(6), D(7)

    if (now.dayOfWeek() == 1) Serial.println("Lunes"); // La variable now.dayOfWeek (dia de
la semana) tendra valor de 1 para dia lunes y 7 para domingo.
    if (now.dayOfWeek() == 2) Serial.println("Martes");
    if (now.dayOfWeek() == 3) Serial.println("Miércoles");
    if (now.dayOfWeek() == 4) Serial.println("Jueves");
    if (now.dayOfWeek() == 5) Serial.println("Viernes");
    if (now.dayOfWeek() == 6) Serial.println("Sábado");
    if (now.dayOfWeek() == 7) Serial.println("Domingo");

Serial.println(); // Línea aparte

// Se publicaran datos de fecha, en numeros
Serial.print("Fecha:");
Serial.print(now.year(), DEC); // Año
Serial.print('/');
Serial.print(now.month(), DEC); // Mes
Serial.print('/');
Serial.print(now.day(), DEC); //
Serial.print(' ');

Serial.print("Hora:"); // Hora en formato 0-23.
Serial.print(now.hour(), DEC); // Horas
Serial.print(':');
Serial.print(now.minute(), DEC); // Minutos
Serial.print(':');
Serial.print(now.second(), DEC); // Segundos
Serial.println();

if ((now.hour() >= 7) && (now.hour() <= 20)){
    temperatura();
}
if ((now.hour() >= 7) && (now.hour() <= 20)){
    higo();
}
if ((now.hour() >= 7) && (now.hour() <= 20)){
    luz();
}

delay (3000);
}
}
    
```